Franjo Majdandžić

Uzemljivači i sustavi uzemljenja

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

GRAPHIS ZAGREB

UDŽBENICI SVEUČILIŠTA JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

Tehnički urednik
Žarko Pavunić

Recenzenti
Prof. dr. sc. Srete Nikolovski
Prof. dr. sc. Lajos Józsa
Prof. dr. sc. Sead Berberović

Lektorica
Dr. sc. Milica Mihaljević

Naslovna stranica
Željko Kozarić

Crteži
Graphis

Nakladnik
GRAPHIS d.o.o., Maksimirska 88, Zagreb
Tel. 01/2322-975, www.graphis.hr

Objavljivanje ovog udžbenika odobrio je Senat Sveučilišta u Osijeku, rješenjem br. 224/1997 od 4.4.1997.

ISBN 953-96399-6-4

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

UDK 621.316.99

MAJDANDŽIĆ, Franjo
Uzemljivači i sustavi uzemljenja /
Franjo Majdanžić. – Zagreb : Graphis, 2004.

Bibliografija. – Kazalo.

ISBN 953-96399-6-4

440421128

Tisak: Dotisak, Zagreb

Tiskanje dovršeno u lipnju 2004.

FRANJO MAJDANDŽIĆ

UZEMLJIVAČI I SUSTAVI UZEMLJENJA

GRAPHIS
ZAGREB

Tehnički urednik
Žarko Pavunić

Recenzenti
Prof. dr. sc. Srete Nikolovski
Prof. dr. sc. Lajos Józsa
Prof. dr. sc. Sead Berberović

Lektorica
Dr. sc. Milica Mihaljević

Naslovna stranica
Željko Kozarić

Crteži
Graphis

Nakladnik
GRAPHIS d.o.o., Maksimirska 88, Zagreb
Tel. 01/2322-975, www.graphis.hr

Objavljivanje ovog udžbenika odobrio je Senat Sveučilišta u Osijeku, rješenjem br. 224/1997 od 4.4.1997.

ISBN 953-96399-6-4

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

UDK 621.316.99

MAJDANDŽIĆ, Franjo
Uzemljivači i sustavi uzemljenja /
Franjo Majdanžić. – Zagreb : Graphis, 2004.

Bibliografija. – Kazalo.

ISBN 953-96399-6-4

440421128

Tisak: Dotisak, Zagreb

Tiskanje dovršeno u lipnju 2004.

FRANJO MAJDANDŽIĆ

UZEMLJIVAČI I SUSTAVI UZEMLJENJA

GRAPHIS
ZAGREB

621.3
KNJIŽNICA
ELEKTRO-
TEHNIČKOG
FAKULTETA
OSIJEK
3480 es

SADRŽAJ

Uvod s predgovorom XVII

1. VRSTE UZEMLJENJA 1
   1.1. Općenito o uzemljenju 1
   1.2. Vrste uzemljenja prema namjeni 3
   1.3. Definiranje pojmova uzemljivača i sustava uzemljenja 5

2. KARAKTERISTIKE TLA 8
   2.1. Vrste tla 8
   2.2. Vrednovanje električne otpornosti tla na području Hrvatske 10
   2.3. Sezonske promjene otpornosti tla i korekcijski koeficijenti 14
      2.3.1. Korekcijski koeficijent otpornosti tla 14
      2.3.2. Utjecaj promjena otpornosti tla na otpor uzemljenja i korekcijski koeficijenti otpora uzemljenja 15
      2.3.3. Korekcija mjernih rezultata otpora uzemljenja 17
   2.4. Specifična svojstva građe tla 18
      2.4.1. Procjenjivanje korozijske agresivnosti tla 18
      2.4.2. Zaštita uzemljenja od korozije 20
      2.4.3. Problemi zaštite uzemljenja od korozije 20
   2.5. Načini poboljšavanja električne vodljivosti tla 21
      2.5.1. Opća svojstva dodatnih materijala 22
      2.5.2. Analiza eksperimentalnih istraživanja fizičko-kemijskih svojstava primijenjenih dodatnih materijala 22

2.6. Utjecaj materijala oko uzemljivača na promjenu otpora uzemljenja 24
2.6.1. Traka u nehomogenom tlu 24
2.7. Mjerenja otpornosti tla u dvoslojnom tlu s pomoću probne sonde 27
2.7.1. Približni izrazi za otpor uzemljenja okomite sonde u dvoslojnom tlu 28
2.7.2. Obrada rezultata mjerenja 31

3. DODIRNI NAPON I NAPON KORAKA I KRITERIJI ZAŠTITE OD ELEKTRIČNOG UDARA 33
3.1. Raspodjela potencijala, napon koraka i dodirni napon 33
3.2. Zaštita od električnog udara 37
3.2.1. Impedancija tijela 40
3.2.2. Faktori koji utječu na impedanciju tijela 44
3.2.3. Dodirni napon i napon koraka 47
3.3. Skraćeni izračun struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo tijekom električnog udara pri naponu dodira i koraka 48
3.4. Točniji izračun struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo tijekom električnog udara pri naponu dodira i koraka 52
3.5. Smanjenje opasnosti od dodirnog napona i napona koraka nasipanjem površine tla šljunčanim slojem 55
3.5.1. Utjecaj debljine sloja šljunka 55
3.5.2. Izračun otpora ljudskog stopala zanemarujući uzajamni otpor između stopala R_{ms} 57
3.5.3. Usporedba rezultata izračuna struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo pri naponu dodira i koraka u točkama 3.3, 3.4 i 3.5, za primjere 3A, 3B, 3C, 3D i 3E 59
3.5.4. Izračun struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo za slučaj dodira (ruka – ruka) 60
3.6. Jakost električnog udara, psihologija i patologija, te pružanje prve pomoći unesrećenomu 61
3.6.1. Jakost električnog udara 61
3.6.2. Psihologija i patologija 61
3.6.3. Prva pomoć 64

4. TEORIJSKE POSTAVKE ZA IZRAČUN OTPORA UZEMLJENJA 65
4.1. Polukuglasti i kuglasti uzemljivač 65
4.1.1. Dva polukuglasta uzemljivača položena na površinu zemlje 66
4.1.2. Kuglasti uzemljivač ukopan u zemlju 68
4.2. Osnove numeričkih metoda za analizu sustava uzemljenja 70
4.3. Matrična metoda za analizu sustava uzemljenja 73
4.4. Numerički metode proračuna sustava uzemljenja 75
4.4.1. Matrični model uzemljivača 76
4.4.2. Uzemljivač *b* nije povezan s drugim uzemljenim dijelovima 77

4.4.3. Uzemljivač *b* nalazi se na nultom potencijalu 78
4.4.4. Uzemljivač *b* spojen je s uzemljivačem *a* 79
4.4.5. Proračun otpora uzemljenja uzemljivača i raspodjele potencijala 79
4.5. Integracijsko-matrična metoda 80
4.5.1. Izračun distribucijskih faktora potencijala *VDF* za međusobni utjecaj dvaju uzemljivača 80
4.5.2. Izračun potencijala za *n* paralelnih uspravnih uzemljivača 85
4.5.3. Izračunavanje distribucijskog faktora potencijala *VDF* za trakasti uzemljivač 89
4.6. Izračun otpora uzemljenja nekih uzemljivača s pomoću distribucijskih faktora potencijala (*VDF*) 91
4.6.1. Trakasti uzemljivač 92
4.6.2. Štapni uzemljivač 93
4.6.3. Mrežasti uzemljivač 95
4.7. Međusobne otpornosti uzemljenja za usporedno i uspravno postavljanje uzemljivača 96
4.7.1. Opća teorija 97
4.7.2. Međusobni otpori uzemljenja za usporedno postavljanje uzemljivača 98
4.7.3. Međusobni otpori uzemljenja za uspravni raspored elemenata uzemljivača 101
4.7.4 Sažetak 108

5. OKOMITO UKOPANI UZEMLJIVAČI 109
5.1. Štapni uzemljivač 109
5.1.1. Teorijske osnove 109
5.1.2. Određivanje otpora uzemljenja R_z štapnog uzemljivača s pomoću dijagrama $R_z = f(\rho_z)$ i $K_s = f(l/d)$ 113
5.1.3. Utvrđivanje otpora uzemljenja R_z štapnog uzemljivača upotrebom dijagrama $R_z = f(\rho_z/K_{Sl})$ 114
5.1.4. Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača ukopanog na određenu dubinu od površine tla 116
5.1.5. Sažetak 116
5.2. Duboki štapni (okomiti) uzemljivač 121
5.3. Uzemljivač sastavljen od štapnih uzemljivača 125
5.4. Pločasti uzemljivač 127

6. TRAKASTI UZEMLJIVAČI 132
6.1. Teorijske osnove 132
6.2. Otpor uzemljenja 136
6.3. Raspodjela potencijala 139
6.4. Koeficijenti iskorištenja složenih trakastih uzemljivača 143

7. TEMELJNI UZEMLJIVAČI 150
7.1. Primjena temeljnih uzemljivača kao združenih uzemljivača 150
7.2. Armirani temelji kao temeljni uzemljivači gromobranske instalacije 152
7.2.1. Tipovi temelja 152
7.2.2. Otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača oblika temeljne stope ili klupe 153
7.3. Promjene otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača tijekom eksploatacije 156
7.4. Napon koraka i dodirni napon 157
7.5. Ugroženost temeljnog uzemljivača 157

8. SASTAVLJENI UZEMLJIVAČI 159
8.1. Teorijske pretpostavke 159
8.1.1. Uzemljivač s jednim vodičem 159
8.1.2. Mrežasti uzemljivač sa N jednako razmaknutih paralelnih vodiča 160
8.1.3. Korekcijski faktor K_m mrežastog uzemljivača sastavljenog od N paralelnih vodiča, za dubinu ukopa h i promjer vodiča d 166
8.1.4. Mrežasti uzemljivač sastavljen od trakastih i štapnih uzemljivača 167
8.2. Kombinirani uzemljivač izveden sa zrakastim uzemljivačima pod pravim kutom 168
8.3. Uzemljivač sastavljen od n paralelnih trakastih uzemljivača 170
8.4. Uzemljivač sastavljen od okomitih štapnih uzemljivača 179
8.5. Paralelno spojeni štapni uzemljivači 181
8.6. Kombinirani uzemljivači sa skupinama štapnih uzemljivača 184
8.7. Kombinirani uzemljivač s mrežastim i štapnim uzemljivačima 189

9. PRSTENASTI UZEMLJIVAČI 196
9.1. Pojednostavnjeni izračun otpora uzemljenja 196
9.2. Točniji izračun otpora uzemljenja 197

10. MREŽASTI UZEMLJIVAČI 201
10.1. Teorijske podloge za približni proračun otpora uzemljenja mrežastih uzemljivača 201
10.1.1. Primjena Ollendorf-Laurentove formule 201
10.1.2. Približni proračun za različite dubine ukopa 202
10.1.3. Opća formula za približni proračun otpora mrežastog uzemljivača 203

10.1.4. Približni proračun otpora mrežastog uzemljivača oblika vodoravne plohe 203
10.2. Teorijske podloge za točniji proračun otpora uzemljenja mrežastih uzemljivača 204
10.2.1. Proračun za različite dubine ukopa 204
10.2.2. Proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu prema Laurentovoj formuli 205
10.2.3. Poboljšanje Laurentove formule 205
10.2.4. Proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu 206
10.2.5. Proračun otpora uzemljenja u dvoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule 206
10.2.6. Proračun otpora uzemljenja u jednoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule 209
10.2.7. Proračun otpora uzemljenja u jednoslojnom tlu uporabom formule prema [32] 209
10.3. Dopušteni dodirni napon i napon koraka 210

11. UZEMLJIVAČI INSTALACIJA ZA ZAŠTITU OD ATMOSFERSKIH PRAŽNJENJA (IMPULSNI UZEMLJIVAČI) 220
11.1. Približni proračun impulsnog otpora štapnog i trakastog uzemljivača 220
11.1.1. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja 222
11.1.2. Analiza proračuna i praktični naputci 227
11.2. Dinamičko modeliranje impulsnih uzemljivača 229
11.2.1. Promjena otpornosti tla ρ_z u ovisnosti o gustoći struje oko uzemljivača 229
11.2.2. Impulsni otpor R_i štapnog uzemljivača 231
11.3. Proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i 233
11.3.1. Parametri uzemljenog vodiča po Rudenbergu 234
11.3.2. Impulsna impedancija za štapni uzemljivač po Gupti 234
11.4. Analitičko modeliranje tranzijentnih karakteristika uzemljivača i praktični proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i 235
11.4.1. Proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i 236
11.4.2. Utjecaj ionizacije tla oko uzemljivača na impulsnu impedanciju uzemljivača Z_i 240
11.4.3. Neki napuci za projektiranje i proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i 241
11.5. Tranzijentne karakteristike impulsnih uzemljivača 247
11.5.1. Opis modela 247
11.5.2. Tranzijentna impedancija uzemljivačkog sustava $Z_i(t)$ 247
11.5.3. Matematički model 249
11.5.4. Rješenje ispod površine zemlje 250
11.5.5. Sinteza odziva u vremenskoj domeni 251
11.5.6. Rezultati proračuna 251

11.6. Impulsni izmjenjivači u elektroenergetskom sustavu 254
11.6.1. Uzemljenje stupova dalekovoda i povratni napon preskoka 256
11.6.2. Napuci za projektiranje i održavanje uzemljenja stupova dalekovoda s aspekta povratnog napona preskoka 262
11.7. Proračun impulsnog otpora uzemljenja za različite vrste uzemljivača 264
11.7.1. Proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za štapne uzemljivače 264
11.7.2. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i trakastog uzemljivača, uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i 266
11.7.3. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za prstenasti i kvadratni uzemljivač, uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i 268
11.7.4. Približni izračun impulsnog otpora uzemljenja R_i različitih uzemljivača uporabom koeficijenta iskorištenja uzemljivača η_u i impulsnog koeficijenta uzemljivača α_i 269

12. VODOVI ZA UZEMLJENJE, KRATKO SPAJANJE VODOVA I SABIRNICA VISOKOG I NISKOG NAPONA 277
12.1. Vodovi za uzemljenje 277
12.2. Naprave za kratko spajanje i uzemljenje vodova, sabirnica visokog i niskog napona 280
12.2.1. Propisi 280
12.2.2. Proračun termičke struje kratkog spoja 282
12.2.3. Dimenzioniranje presjeka vodiča zemljovoda (prijenosne naprave za uzemljenje i kratko spajanje) 284

13. PROJEKTIRANJE I IZVOĐENJE UZEMLJIVAČA NA TRANSFORMATORSKIM STANICAMA 10(20)/0,4 kV I STUPOVIMA DALEKOVODA 10(20) KV 286
13.1 Projektiranje uzemljivača elektroenergetskih objekata 286
13.1.1. Matematički model 286
13.1.2. Napuci za projektiranje uzemljivača 290
13.2. Izvedba uzemljivača u transformatorskim stanicama 10(20)/0,4KV i linijskom rastavljaču 290
13.2.1. Izvedba uzemljivača u TS 10(20)/0,4 kV u uvjetima uzemljenog zvjezdišta putem otpornika, s ograničenjem struje zemljospoja na vrijednost 150 A ili 300 A 290
13.2.2. Izvođenje radnog i zaštitnog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV u uvjetima uzemljenog zvjezdišta 10(20)kV mreže sa združenim, odnosno odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem 295
13.2.3. Izvođenje uzemljenja linijskog rastavljača s oblikovanjem potencijala na manipulativnoj površini 302

13.3. Uzemljivači stupova nadzemnih vodova visokog napona 305
13.3.1. Uzemljivači stupova nadzemnih vodova 10(20) kV s uzemljenom neutralnom točkom preko otpora 305
13.3.2. Tipski uzemljivači 305
13.3.3. Tipski izemljivači čeličnih stupova 306
13.3.4. Izrada uzemljenja stupova za zaštitu od atmosferskih pražnjenja 307
13.3.5. Zaštita od pogonskog napona 308
13.3.6. Posebni zahtjevi za smanjenje dodirnog napona i napona koraka 309
13.3.7. Razdioba potencijala oko uzemljivača za područje galvanskog utjecaja 309
13.3.8. Mogućnost zaštite od opasnog dodirnog napona i napona koraka 310
13.4. Izvođenje uzemljenja na posebnim objektima kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača 317
13.4.1. Specifični uvjeti za izvođenje uzemljenja na površinskom kopu 317
13.4.2. Rezultati analize 320
13.4.3. Napuci za projektiranje i održavanje uzemljivača na posebnim objektima 323

14. UPORABA METALNOG PLAŠTA KABELA ZA OSTVARIVANJE REDUKCIJSKOG FAKTORA UZEMLJENJA I KAO UZEMLJIVAČA KOD IPO KABELA 324
14.1. Redukcijski faktori kabela 325
14.2. Primjena metalnog plašta kabela kao uzemljivača 329
14.3. Primjeri uporabe metalnog plašta kabela kao uzemljivača 332
14.4. Problem iznošenja potencijala iz postrojenja 335

15. DOPRINOS ARMIRANOBETONSKIH TEMELJA SMANJENJU OTPORA UZEMLJENJA STUPOVA 339
15.1. Rezultati mjerenja 340
15.1.1. Eksperimentalni uzemljivači na dalekovodima 340
15.1.2. Eksperimentalni uzemljivači na posebnom poligonu 344
15.2. Ispitivanje promjene otpora uzemljenja betonskih uzoraka 344
15.3. Iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova 346
15.3.1. Iskustva u Ruskoj Federaciji 346
15.3.2. Iskustva u Mađarskoj 347
15.3.3. Iskustva u Francuskoj 347
15.3.4. Iskustva u SR Njemačkoj 347
15.3.5. Iskustva u Hrvatskoj 348
15.3.6. Iskustva u SAD-u 348
15.4. Napuci za projektiranje 349

16. ANALIZA IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA STUPOVA NADZEMNIH VODOVA VISOKOG NAPONA 351
16.1. Impulsni otpor uzemljivača R_i 351
16.2. Primjeri izračuna impulsnog otpora uzemljenja za različite konstrukcije uzemljivača 352
16.3. Utjecaj impulsnog otpora uzemljenja stupova dalekovoda 110 kV na broj preskoka (trajnih ispada) voda 355

17. UZEMLJENJE OGRADE ELEKTROENERGETSKOG POSTROJENJA I MJERE ZA SMANJENJE DODIRNOG NAPONA 358
17.1. Analiza dodirnog napona ograde 359
17.2. Neuzemljena ograda 359
17.3. Uzemljena ograda 361
17.4. Napuci za projektiranje i izradu uzemljivača ograde 364
17.5. Mjere za smanjenje dodirnog napona ograde elektroenergetskog postrojenja 365
17.5.1. Izjednačenje potencijala na rubovima ograde 366
17.5.2. Izjednačenje potencijala na srednjim dijelovima ograde 367
17.5.3. Smanjenje potencijala ograde 368
17.5.4. Kombinirane mjere 370
17.5.5. Napuci za smanjenje dodirnog napona na ogradi elektroenergetskog postrojenja 370

18. PRORAČUN RAZDIOBE POTENCIJALA I IZNOŠENJE POTENCIJALA U INSTALACIJU NISKOG NAPONA NA PRIMJERU ZAJEDNIČKOGA I ODVOJENOGA RADNOG I ZAŠTITNOG UZEMLJENJA TS *X*/0,4kV 372
18.1. Analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 kV primjenom računala i mjerenje u elektrolitskoj kadi 373
18.2. Zaštitni i radni uzemljivači 374
18.2.1. Galvanski odvojeni uzemljivači 375
18.2.2. Radni uzemljivač na nultom potencijalu 376
18.2.3. Međusobno spojeni uzemljivači 376
18.2.4. Galvanski odvojeni uzemljivači, a neizolirani vodljivi omotač kabela spojen sa zaštitnim uzemljivačem 376
18.3. Galvanski odvojeni zaštitni i radni uzemljivači 376
18.4. Zaštitni uzemljivač i kabel s neizoliranim vodljivim omotačem 377
18.5. Tipični zaštitni i tipični radni uzemljivač 378
18.6. Uzemljivači galvanski odvojeni 379
18.7. Radni uzemljivač na nultom potencijalu 381
18.8. Međusobno spojeni uzemljivači 384

19. POSEBNI UZEMLJIVAČI 387
19.1. Uzemljivači velike duljine 387
19.2. Obručni uzemljivač kao površinski uzemljivač ($h = 0$) 389
19.3. Obručni uzemljivač ukopan u dubinu h 391
19.4. Uzemljivači u riječnom koritu 395
19.5. Karakteristike tipskih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih i štapnih uzemljivača 396
19.6. Otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža 402
19.6.1. Uvod 402
19.6.2. Prednost metalnih otpornika za uzemljenje neutralne točke elektroenergetske mreže u odnosu na elektrolitske 403
19.6.3. Karakteristike metalnih otpornika za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetske mreže 403
19.6.4. Iskustva poznatih svjetskih proizvođača otpornika za uzemljenje 406
19.6.5. Sažetak 408
19.7. Uzemljenje zvjezdišta srednjonaponske mreže 10(20) kV kombinacijom otpornik–prigušnica za područja s visokom otpornošću tla 409
19.7.1. Osnovne tehničke značajke kompenzacijske prigušnice 409
19.7.2. Uvjeti uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže putem otpornika 410
19.7.3. Alternativno rješenje 413
19.7.4. Kombinacija otpornik–prigušnica 413
19.7.5. Sažetak 416

20. ISPITIVANJE UZEMLJENJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA VISOKOG NAPONA 417
20.1. Metode mjerenja 417
20.2. Način ispitivanja 419
20.3. Određivanje struje mjerodavne za podizanje potencijala 421
20.3.1. Utjecajni faktori za dimenzioniranje postrojenja i uzemljivača 421
20.3.2. Kratki spoj u postrojenju 423
23.3.3. Kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja 425
20.4. Osvrt na propise i preporuke 425

21. PRORAČUN OTPORA UZEMLJENJA I RAZDIOBE POTENCIJALA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA *CYMGRN* ZA RAZLIČITE VRSTE UZEMLJIVAČA 427
21.1. Uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV za izoliranu neutralnu točku 427

21.2. Uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem za uzemljenu neutralnu točku pri struji zemljospoja 300 A 431
21.3. Uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri zrakasta uzemljivača, za struju zemljospoja 300 A 435
21.4. Uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri štapna uzemljivača za struju zemljospoja 300 A 439
21.5. Uzemljenje montažne betonske transformatorske stanice (MBTS)10(20)/0,4 kV za struju zemljospoja $I_z = 300$ A s dvokonturnim uzemljivačem 443
21.6. Uzemljenje montažne betonske transformatorske stanice (MBTS)10(20)/0,4 kV za struju zemljospoja $I_z = 300$ A s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri zrakasta uzemljivača 446
21.7. Uzemljenje montažne betonske transformatorske stanice (MBTS)10(20)/0,4 kV za struju zemljospoja $I_z = 300$ A s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri štapna (cijevna) uzemljivača 450
21.8. Trakasti uzemljivač u obliku trokuta sa štapnim uzemljivačima na kutovima 455
21.9. Uzemljivač stupa dalekovoda od 110 kV 458
21.10. Mrežasti uzemljivač TS 110/10 kV 461

PRILOZI 468

P1. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV za područje uzemljenja (Sl. list br. 65/88, Narodne novine br. 53/91) 468
P2. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadajućih transformatorskih stanica za područje uzemljenja (Sl. list br. 13/78, Narodne novine br. 53/91) 472
P3. Izvod iz tehničkih propisa o gromobranima, iz područja uzemljenja (Sl. list br. 4/74 i 13/78, Narodne novine br. 53/91) 486
P4. Izvod iz Pravilnika o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja iz područja zaštite od prenapona (Sl. list br. 19/68, Narodne novine br. 53/91) 494
P5. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu statičkog elektriciteta, za područje uzemljenja (Sl. list br. 62/73, Narodne novine br. 53/91) 494

P6. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, za područje uzemljenja (Sl. list br. 4/74 i 13/78, Narodne novine br. 53/91) 500
P7. Izvod iz Uputa za projektiranje, izgradnju i održavanje uzemljenja PTT objekata i postrojenja (PTT vjesnik br. 9/83). Izvođenje uzemljenja u telefonskim kabelskim mrežama 517
P8. Izvod iz Pravilnika o zaštiti na radu pri korištenju električne energije (Narodne novine br. 9/87) za područje uzemljenja 538
P9. Izvod iz hrvatske norme HD 637 S1:1999 (prihvaćena kao hrvatska norma HRN HD 637 S1:2002), Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, za područje uzemljenja 539

Literatura 575
Popis slovnih simbola 581
Kazalo 593

UVOD S PREDGOVOROM

Iznimno velika primjena različitih vrsta uzemljenja i sustava uzemljenja pri projektiranju, izgradnji i održavanju elektroenergetskih postrojenja, električnih i gromobranskih instalacija, sustava informatike i računala te premalo literature u kojoj se obrađuje i prezentira sva ta opširna i kompleksna problematika dalo mi je ideju i motivaciju da ovu građu prikupim, revidiram i na aplikativan način prezentiram u ovoj knjizi.

Sve veća primjena električne energije uvjetuje intenzivnu izgradnju proizvodnih, prijenosnih, distributivnih električnih postrojenja mreže i instalacija svih naponskih razina uz odgovarajuću pouzdanost i sigurnost pogona i kvalitetnu i sigurnu zaštitu ljudi i električnih uređaja. To uvjetuje kvalitetne i pouzdane uzemljivače i sustave uzemljenja.

Razvoj uzemljenja i mjere zaštite od opasnoga dodirnog napona i napona koraka u nepovoljnim uvjetima urbanizacije kada se mora primjenjivati združeno a ne odvojeno radno i zaštitno uzemljenje te zbog povećanja pouzdanosti i sigurnosti srednjonaponskih mreža pri prekomjernim kapacitivnim strujama zemljospoja i prelaska s izoliranog na uzemljeno zvjezdište sa ograničenjem struje zemljospoja, usložnjava problematiku uzemljivača i optimiranja dopuštenoga dodirnog napona i napona koraka, zbog znatno veće struje zemljospoja.

U cilju potpunije informacije budućim korisnicima ove knjige, navest ću kratak sadržaj pojedinih poglavlja, pa neka čitatelj korisnik, sam prosudi na koji će način učiniti knjigu korisnom za primjenu.

– U prvom poglavlju opisane su vrste uzemljenja, definirani pojmovi uzemljivača i sustava uzemljenja. Dokazana je svrsishodnost uvođenja pojma otpora uzemljenja umjesto nejasnih i nepraktičnih pojmova: otpora rasprostiranja, otpora zemljovoda i sveukupni otpor kao otpor uzemljenja.

– U drugom poglavlju obrađuju se karakteristike s aspekta električne otpornosti, ovisnosti o strukturi i vlažnosti tla, korozijske agresivnosti tla te načini poboljšanja vodljivosti tla.

– Treće poglavlje definira dodirni napon i napon koraka u smislu propisanih i dopuštenih iznosa, temeljitije se obrađuje otpornost i zaštita od električnog udara s posebnim izračunom otpora ljudskog tijela u različitim mogućnostima ostvarivanja dodira i koraka te protok struje kroz ljudsko tijelo i mjere zaštite. To je suvremen pristup koji je preuzet iz inozemne literature [4] i pruža mnogo veće mogućnosti i pri većem od dopuštenoga dodirnog napona uz primjenu racionalnih mjera zaštite, koje se danas i primjenjuju.

– U četvrtom poglavlju daje se teoretska podloga za izračun jednostavnih uzemljivača i sustava uzemljenja. Tu su posebno istaknute matrične i integracijsko-matrične metode s uvođenjem pojma distribucijskog faktora potencijala (VDF) kao kategorije otpora uzemljenja, a za različit prostorni razmještaj pojedinih uzemljivača. Tom metodom moguće je točnije izračunati otpor sustava uzemljivača respektirajući međusobni utjecaj pojedinih uzemljivača.

– Peto poglavlje obrađuje teoretske osnove i konačne formule za izračun otpora uzemljenja jednostavnih i u praksi primjenljivih uzemljivača, kao što su to: štapni, trakasti, pločasti, sastavljeni uzemljivači i kao posebna zanimljivost izrazito duboki štapni uzemljivači.

– U šestom poglavlju obrađen je teoretski pristup i praktični izračuni otpora uzemljenja i razdiobe potencijala s mnogo primjera trakastih pojedinačnih i sastavljenih uzemljivača. Uočljive su razlike izračuna po različitim formulama, a za praktičnu primjenu korisni su mnogi primjeri i naputci za projektiranje i izgradnju uzemljivača.

– Sedmo poglavlje obrađuje građu temeljnih uzemljivača s teoretskom podlogom, primjerima izračuna te navodi proturječnosti kod pojedinih autora glede vremenske stabilizacije otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača. To svakako upućuje na daljnje istraživanje u stvarnim uvjetima izvođenja temelja i stabilnosti otpora uzemljenja uzimajući u obzir veliku primjenu temeljnih uzemljivača.

– U osmom poglavlju dane su teoretske osnove i konačne formule za sastavljene uzemljivače koji se sastoje od više trakastih uzemljivača i kombinacije štapnih uzemljivača. Posebno je zanimljiv uzemljivač sastavljen od skupine štapnih uzemljivača te mrežastih i štapnih uzemljivača.

– Deveto poglavlje obrađuje pojednostavljene i točnije izračune otpora uzemljenja različitih konstrukcija prstenastih uzemljivača.

– U desetom poglavlju obrađeni su mrežasti uzemljivači primjenom različitih pristupa u približnom i točnijem izračunu otpora uzemljenja, dodirnog napona i napona koraka. Tu se već pokazuju različite mogućnosti računalnim izračunom korištenjem određenih programa.

– Jedanaesto poglavlje obrađuje uzemljivače instalacija za zaštitu od atmosferskih instalacija s teoretskim podlogama i praktičnim izračunima postavljajući gradaciju u odnosu na uzemljivače za struje tehničke frekvencije. Tu se također dokazuje opravdanost uvođenja pojma otpora uzemljenja impulsnim strujama munje kao impulsni otpor uzemljenja R_i. Za praksu su korisni proračuni impulsnog otpora uzemljenja za različite konstrukcije impulsnih uzemljivača.

– U dvanaestom poglavlju dan je kraći osvrt na proračun i odabir vodova za uzemljenje i kratko spajanje.

– Trinaesto poglavlje obrađuje problematiku projektiranja i izvođenja uzemljivača na transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV i stupovima dalekovoda 10(20) kV. Za primjenu u praksi zanimljivi su pojednostavljeni izračuni otpora uzemljenja normiranih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinacijama sa združenim i odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem.

– Četrnaesto poglavlje obrađuje aspekte uporabe metalnog plašta kabela za ostvarivanje redukcijskog faktora uzemljenja kao posebne pogodnosti u uzemljenim mrežama preko otpora srednjonaponskih mreža gdje se struja zemljospoja znatno povećava (na iznos 300 A ili 150 A), a s time se povećava dodirni napon i napon koraka. U ovom poglavlju obrađuje se i problematika iznošenja potencijala iz jedne TS u druge trafostanice putem različitih vodiča u zemlji i zraku koji povezuju ove trafostanice.

– Petnaesto poglavlje obrađuje doprinos armiranobetonskih temelja stupova smanjenju otpora uzemljenja stupova za različite konstrukcije uzemljivača. Također je dana problematika eksperimentalnih ispitivanja dugogodišnje promjene otpora uzemljenja stupova na raznim dalekovodima, kao i iskustva u konstrukciji uzemljivača stupova dalekovoda u mnogim državama.

– U šesnaestom poglavlju analizirani su impulsni otpori uzemljenja stupova nadzemnih vodova visokog napona.

– Sedamnaesto poglavlje obrađuje problematiku uzemljenja ograde elektroenergetskog postrojenja i mjere za smanjenje dodirnog napona te prijedloge rješenja i naputke za projektiranje.

– Osamnaesto poglavlje obrađuje problematiku zajedničkoga i odvojenoga radnog i zaštitnog uzemljivača u TS X/0,4 kV s aspekta iznošenja potencijala i opasnosti od dodirnog napona u instalacijama niskog napona.

– U devetnaestom poglavlju obrađeni su posebni uzemljivači, kao što su uzemljivači velike duljine, obručasti kružni uzemljivač, uzemljivač u riječnom koritu i karakteristični tipski uzemljivač TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih i štapnih uzemljivača. Također je obrađen otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža kao i novije tendencije za uzemljenje 10(20) kV mreže s pomoću otpornika i prigušnice.

– Dvadeseto poglavlje obrađuje ispitivanja elektroenergetskih postrojenja visokog napona simulirajući kratki spoj u postrojenju za različite konfiguracije elektroenergetskih postrojenja.

– U posljednjem dvadeset i prvom poglavlju dan je postupak i računalni izračun otpora uzemljenja i razdiobe potencijala za različite vrste uzemljenja transformatorskih stanica srednjeg i visokog napona. U primjerima su dani izračuni otpora uzemljenja, profil potencijala na tlu iznad uzemljivača, prostorna razdioba potencijala i profil dodirnog napona i napona koraka po određenom pravcu (presjeku) uzemljivača. Ti izračuni potvrđuju tezu o mogućnostima primjene računala s određenim programima za proračun i modeliranje tipskih i složenih uzemljivača uz razumijevanje problematike uzemljenja.

– U prilogu knjizi dani su izvodi iz Pravilnika, tehničkih propisa i uputa za područje uzemljenja koji su neophodni za projektiranje i održavanje uzemljenja i sustava uzemljenja. Također su navedene osnovne odrednice za područje uzemljenja po hrvatskoj normi HD 637 S1:1999.

Autor duguje posebnu zahvalu uredniku ove knjige prof. dr. sc. Zvonku Benčiću na svestranoj potpori koju mi je pružio tijekom rada na rukopisu s mnogobrojnim prijedlozima, mišljenjima i sugestijama. Osobito sam zahvalan recenzentima: prof. dr. sc. Rete Nikolovski i prof. dr. sc. Lajoš Josza sa Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku i prof. dr. sc. Seadu Berberoviću sa Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Oni su mi s mnogim prijedlozima i mišljenjima veoma pomogli u sastavljanju i oblikovanju ove knjige.

U Zagrebu, u lipnju 2004.

Franjo Majdandžić

1. VRSTE UZEMLJENJA

1.1. OPĆENITO O UZEMLJENJU

Pod *uzemljenjem* razumijevamo galvanski spoj između metalnoga uzemljenog dijela električnog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže koja iz bilo kojeg razloga može biti pod naponom i zemlje s pomoću uzemljivača. *Uzemljivači* su metalni dijelovi ukopani u zemlju radi ostvarivanja galvanskog spoja uzemljenog dijela sa zemljom. Uzemljenje se izvodi iz sljedećih razloga:

a) da osigura sigurnost živih bića, u prvome redu ljudi, za vrijeme normalnog ili poremećenog stanja električnog sustava
b) da osigura ispravan rad električnih uređaja, postrojenja, mreža i instalacija
c) da stabilizira napon za vrijeme prijelaznog (tranzijentnog) stanja i prema tome da svede na najmanju moguću mjeru vjerojatnost nastajanja kvarova za vrijeme tog stanja
d) da zajamči sigurnost ljudi s obzirom na napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama zemljospoja.

Uzemljenje se izvodi sustavom vodiča koji moraju svojim dimenzijama i oblikom, skupa sa slojevima okolišnog tla, spriječiti sve štetne posljedice koje nastaju pri poremećaju sustava i stvaranju napona opasnog po čovjeka i živa bića.

Misleći u prvom redu na čovjekovu zaštitu, došlo se do pojmova kao što su *dodirni napon* i *napon koraka* koji se ne smiju prekoračiti ni pri kojem poremećaju električnog sustava. Da bi se ostvario *dopušteni dodirni napon* i napon koraka, uzemljivač mora s okolišnom zemljom pružati što manji otpor rasprostiranju struje. Obično uzemljivač sam po sebi ne pruža veliki otpor struji, pa se otpor uzemljivača u odnosu na otpor tla može zanemariti. Naprotiv, zemlja ili bolje rečeno tlo oko uzemljivača, pruža veliki otpor struji pri rasprostiranju te ako je velika struja zemljospoja I_z, može nastati veliki pad napona, a time i veliki dodirni napon i napon koraka, što je posebno izraženo kada tlo ima veliki specifični otpor ρ_z ili pri velikoj struji zemljospoja I_z.

Za razumijevanje uzemljivača i sustava uzemljenja, moraju se definirati sljedeći pojmovi.

a) Pod *otporom rasprostiranja* R_r podrazumijeva se otpor koji prolasku struje pruža onaj dio zemlje koji se nalazi između uzemljivača i zone u kojoj se struja širi kroz toliki presjek tla da njezina gustoća postaje vrlo mala. Slojevi zemlje izvan te granice, u električnom se smislu nazivaju *neutralna zemlja*, *daleka zemlja* ili *referentna zemlja*. Možemo pojednostavljeno reći da je otpor rasprostiranja R_r uzemljivača otpor između uzemljivača i neutralne zemlje.

b) *Otpor uzemljenja* R_z čini otpor rasprostiranja R_r i *otpor zemljovoda* R_{zv}, te je $R_z = R_r + R_{zv}$. Kako je otpor zemljovoda (kako će se to kasnije vidjeti) zanemarivo male vrijednosti u odnosu na otpor uzemljenja, to se za praktična razmatranja može zanemariti i poistovjetiti otpor uzemljenja s otporom rasprostiranja, dakle $R_z \cong R_r$. To ima višestruko značenje, jer se propisima i normama definira vrijednost otpora uzemljenja R_z, a ne otpora rasprostiranja R_r. S druge strane otpor uzemljivača definira se kao otpor rasprostiranja. Uspoređujući specifični otpor zemlje relativno dobre vodljivosti $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$ sa specifičnim otporom željeza ρ_{Fe} (od kojeg se prave trakasti, pločasti i štapni uzemljivači) dobivamo omjer:

$$\frac{\rho_z}{\rho_{\text{Fe}}} = \frac{100}{10 \times 10^{-8}} = 1 \times 10^9,$$

što znači da je specifični otpor zemlje milijardu puta veći od specifičnog otpora čelika, te se otpor zemljovoda može uvijek zanemariti i poistovjetiti R_z s R_r. Za bakrene uzemljivače taj je omjer još povoljniji. Ispitivanjem uzemljivača i sustava uzemljenja mjeri se otpor uzemljenja, a ne otpor rasprostiranja. S druge strane proračunom otpora uzemljenja utvrđuje se otpor rasprostiranja R_r, a ne otpor uzemljenja R_z. Dakle, iz praktičnih razloga napravit ćemo pogrešku, te ćemo otpor rasprostiranja R_r poistovjetiti s otporom uzemljenja R_z. Valja napomenuti da je prema novoj hrvatskoj normi za ovo područje HD 631 S1:1999 postoji samo pojam otpor uzemljenja i impedancija uzemljenja a ne otpor rasprostiranja. Otpor uzemljenja može se izraziti kao omjer napona U_z između uzemljivača i neutralne zemlje i struje I_z koja struji kroz uzemljivač u zemlju, te je: $R_z = U_z/I_z$.

c) *Struja uzemljenja* I_z protiče u zemlju preko istosmjerna ili izmjenična uzemljivača, tehničke frekvencije 50 Hz ili 60 Hz ili pak viših frekvencija, i to obično u slučaju kvara. Katkad je uzemljivač obvezni dio strujnog kruga. To je u slučaju kada je uzemljena neutralna točka transformatora ili generatora u elektroenergetskom sustavu, te takve uzemljivače nazivamo *pogonskim* ili *radnim uzemljivačima*, jer su stalno dio strujnog kruga.

d) *Udarni* ili *impulsni otpor uzemljenja* R_i mjerodavan je za odvođenje struje munje koja ima oblik kratkog impulsa. Pri provođenju takvih impulsnih struja, impulsni otpor uzemljenja R_i nema istu vrijednost kao pri provođenju izmjenične struje tehničke frekvencije ili istosmjerne struje, i ima veću ili manju vrijednost

u ovisnosti od duljine uzemljivača, oblika i trajanja prenaponskog vala te specifičnog otpora tla.

e) *Otpornost tla* ρ_z najvažniji je ulazni podatak pri proračunu otpora uzemljenja. Procjenjuje se na osnovi izvida i analize strukture tla ili u najboljem slučaju mjerenjem otpornosti tla na površini i dubini u kojoj se polaže uzemljivač. Otpornost tla ρ_z treba razumijevati kao specifični električni otpor tla i ima dimenziju Ωm. Pri tom ispitivanju potrebno je utvrditi vlažnost i temperaturu tla na dubini ispitivanja tla. To je potrebno kako bi se što točnije utvrdila vrijednost otpornosti tla kao najvažniji podatak u proračunu otpora uzemljenja i razdioba potencijala oko uzemljivača. Slojevi tla bliže uzemljivaču pružaju veći otpor struji od onih udaljenih zbog manjeg presjeka za istu debljinu sloja. Zbog toga prvi slojevi troše veći dio ukupnog napona uzemljivača od onih koji su udaljeniji od uzemljivača. Otpor uzemljenja ne ovisi samo o obliku, dimenzijama i broju uzemljivača, nego i o otpornosti tla i dubini ukopa uzemljivača.

f) *Dodirni napon* U_d razlika je potencijala između napona uzemljivača U_z kroz koji teče struja zemljospoja I_z (pri poremećaju sustava) i napona na kojem je osoba koja je dodirnula uzemljenu strukturu. Razumljivo je da je ta razlika potencijala u funkciji udaljenosti od uzemljivača, te se dodirni napon definira na udaljenosti od 1 m. Dodirni napon U_d kroz osobu koja je dodirnula uzemljenu strukturu generira određenu struju.

g) *Napon koraka* U_k razlika je potencijala između stopala kada osoba ili živo biće hoda po površini zemlje gdje je razdioba potencijala položenog uzemljivača. Napon koraka ovisi o duljini koraka, te se definira razmakom stopala (koraka) od 1 m. Namjerno je kazano živo biće, a ne samo čovjek, jer se u praksi susreću problemi zaštite živih bića (najčešće četveronožaca, konja, goveda i sl.) koji stradavaju zbog napona koraka, naime, zbog većeg razmaka nogu dolaze pod veći napon koraka od čovjeka.

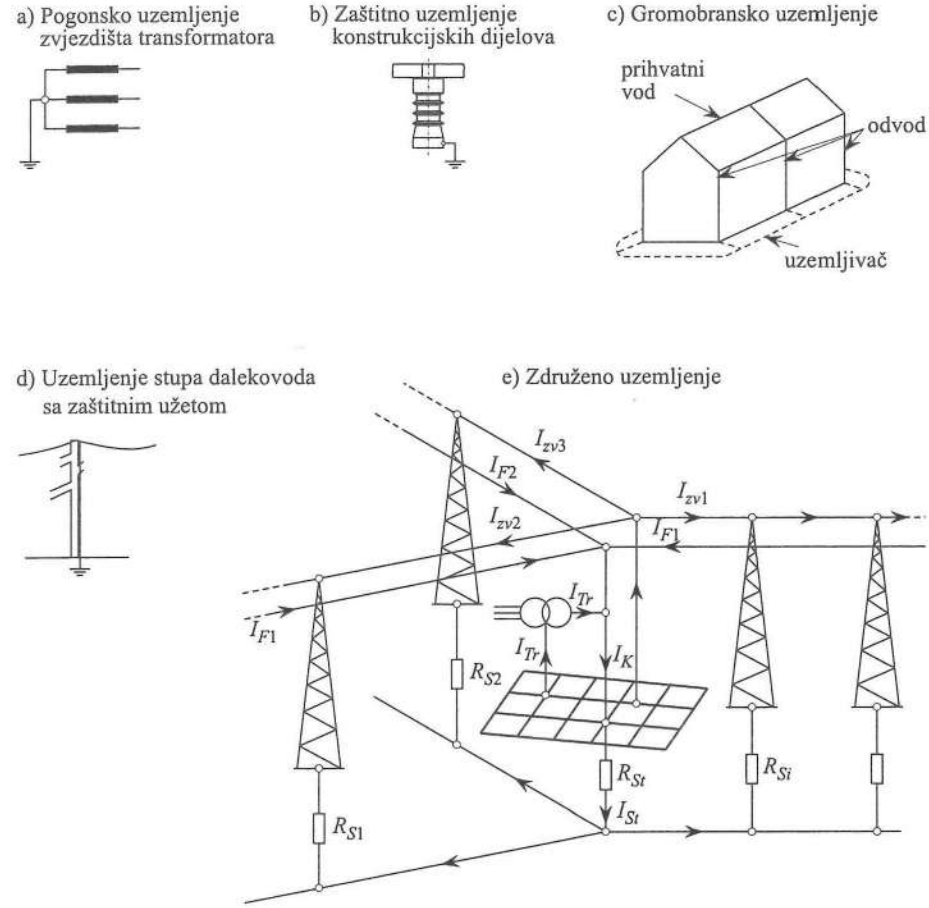
1.2. VRSTE UZEMLJENJA PREMA NAMJENI

Prema namjeni koju imaju u pogonu uzemljenja se mogu podijeliti na četiri osnovne vrste:

a) pogonsko ili radno uzemljenje
b) zaštitno uzemljenje
c) gromobransko uzemljenje, (tj. uzemljenje sustava zaštite od munje)
d) združeno uzemljenje,

kako je to prikazano na slici 1.2–1.

a) *Pogonsko uzemljenje*, slika 1.2–1.a), karakterizirano je time da je na zemlju spojena točka postrojenja koja pripada strujnom krugu, pa je na taj način sam strujni krug galvanski spojen sa zemljom. Na slici 1.2–1.a) prikazano je uzemljenje nultočke preko transformatora kao najčešće pogonsko ili radno uzemljenje. No,



Sl. 1.2–1. Vrste uzemljenja prema namjeni.

i bilo kakvo uzemljenje mreže (kruto ili neposredno uzemljenje zvjezdišta, uzemljenje zvjezdišta preko otpora, reaktancije ili impedancije, uzemljenje nultog vodiča niskonaponske mreže) spada u pogonsko uzemljenje.

b) *Zaštitno uzemljenje* karakterizirano je time što je sa zemljom spojena točka postrojenja koja ne pripada strujnom krugu i koja ne smije doći u galvansku vezu sa strujnim krugom, ali ne može se izbjeći da do takve veze dođe zbog kvara na izolaciji. Na slici 1.2–1.b) prikazano je uzemljenje konstrukcijskih dijelova postrojenja (npr. nosači izolatora) kao tipičan primjer takvog uzemljenja.

c) *Gromobransko uzemljenje*, slika 1.2–1.c), služi za odvod u zemlju struje munje, tj. struje prouzrokovane atmosferskim pražnjenjima, spajajući gromobransku instalaciju s gromobranskim uzemljivačem. Gromobransko uzemljenje može biti odvojeno ili zajedničko sa zaštitnim i pogonskim uzemljenjem. Gromobransko

uzemljenje treba dimenzionirati za uvjete impulsne struje munje, pa se zbog toga naziva i impulsni uzemljivač.

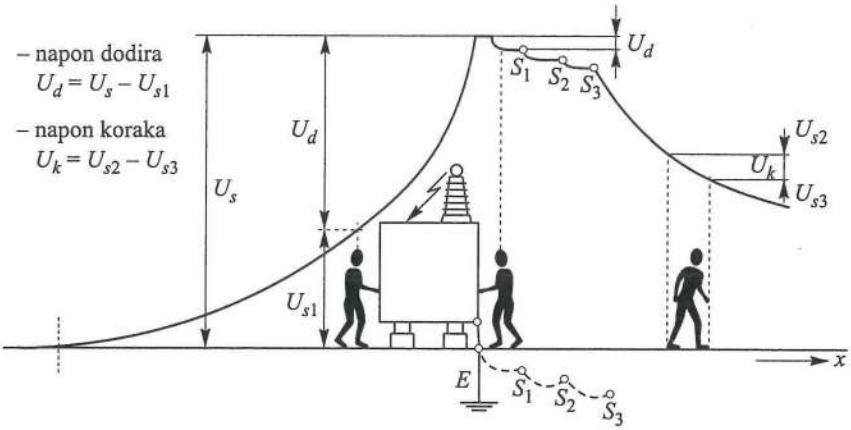
Prema tome, pogonsko uzemljenje stalno obavlja svoju funkciju za vrijeme rada elektroenergetskog sustava, gromobransko uzemljenje samo za vrijeme trajanja prenapona, a zaštitno uzemljenje samo za vrijeme trajanja kvara na izolaciji. Pojedina uzemljenja imaju dvojaku funkciju, npr. uzemljenje željeznog ili betonskog stupa dalekovoda sa zaštitnim užetom ima funkciju zaštitnog uzemljivača i gromobranskog uzemljivača, te se za te uvjete rada mora i projektirati, slika 1.2–1.d).

d) *Združeno uzemljenje*, slika 1.2–1.e), spajanje je dvaju ili više različitih vrsta uzemljenja na jedan uzemljivač, na primjer pogonskog i zaštitnog uzemljenja ili pogonskoga zaštitnog i gromobranskog uzemljenja, te zbog toga združeno uzemljenje mora zadovoljiti uvjete svih vrsta uzemljenja koja se spajaju zajedno.

1.3. DEFINIRANJE POJMOVA UZEMLJIVAČA I SUSTAVA UZEMLJENJA

- Definicije uzemljenja dane su u normama: VDE, 0141/7.76, HD 637 S1:1999 (Prilog P1) [32], [L72] kao i u drugim normama i propisima (L2, L16, L41 i dr.).
- Uzemljiti znači ostvariti galvansku vezu između metalnog dijela postrojenja i zemlje.
- Zaštitno uzemljenje izravno je uzemljenje metalnih dijelova električnog postrojenja koji ne pripadaju strujnom krugu radi zaštite ljudi od dodirnog napona i napona koraka (sl. 1.2–1.b).
- Pogonsko uzemljenje uzemljenje je metalnih dijelova koji pripadaju strujnom krugu električnog postrojenja (sl. 1.2–1.a).
- Gromobransko uzemljenje uzemljenje je koje služi za odvođenje električne struje prouzročene atmosferskim pražnjenjem (sl. 1.2–1.c).
- Uzemljivači su metalni dijelovi koji se nalaze u zemlji i ostvaruju električni vodljivi spoj uzemljenih dijelova postrojenja sa zemljom, kao i neizolirani vodiči koji služe za spajanje uzemljenih dijelova postrojenja sa zemljom na dijelu u kojem su položeni u zemlji.
- Ovisno o obliku, uzemljivači mogu biti: trakasti, štapni i pločasti, mrežasti, kombinirani ili sastavljeni od pojedinih osnovnih uzemljivača (najčešće od trakastih i štapnih, mrežastih i trakastih uzemljivača) i temeljni (tj. trakasti uzemljivač položen u betonski temelj objekta).
- Zemljovod je vod između metalnih dijelova koji se uzemljuju i uzemljivača.
- Sustav uzemljenja skup je međusobno vodljivo spojenih uzemljivača, zemljovoda i sabirnih vodova.
- Otpor uzemljenja R_z zbroj je otpora rasprostiranja uzemljivača R_r i otpora zemljovoda R_{zv}.

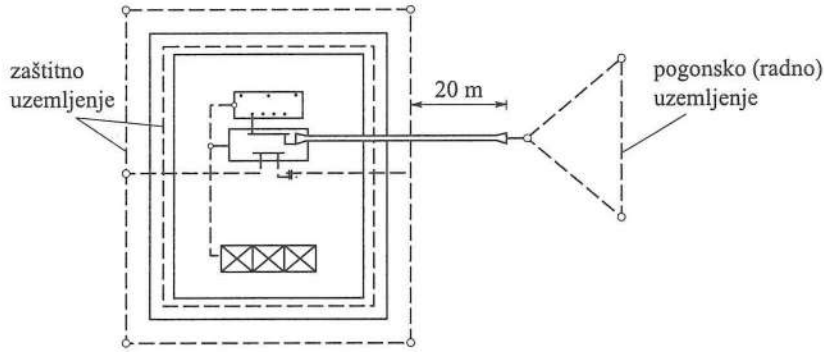
- Otpor rasprostiranja uzemljivača R_r odnosno sustava uzemljenja otpor je zemlje između uzemljivača i neutralne zemlje. Pod neutralnom zemljom podrazumijeva se područje zemljišta, a naročito njegova površina, koja je od pripadajućeg uzemljivača udaljena toliko da se između bilo kojih točaka tog područja ne pojavljuju značajnije potencijalne razlike.
- Impulsni otpor uzemljivača R_i otpor je koji se javlja pri prolasku impulsne struje, i čija je vrijednost promjenljiva ovisno od vremena trajanja impulsne struje; taj se otpor naziva i udarni otpor uzemljenja R_u. U daljnjem razmatranju upotrebljavat će se naziv impulsni otpor uzemljenja R_i. Za točnije izračune upotrebljava se impulsna impedancija uzemljenja Z_i umjesto impulsnog otpora uzemljenja R_i.
- Otpornost zemlje električni je otpor 1 m^3 zemlje izmjeren između dviju suprotnih strana kocke čiji je rub 1 m i izražava se u Ωm, te je ustaljen i naziv specifični otpor tla.
- Napon uzemljivača napon je koji pri struji zemljospoja nastaje između uzemljivača, odnosno sustava uzemljenja, i referentne zemlje.
- Naponski lijevak grafički je prikaz razdiobe napona oko uzemljivača pri zemljospoju. Prikazan je na slici 1.3–1, lijeva je krivulja krivulja normalne razdiobe potencijala, a desna krivulja u dijelu S_1, S_2, S_3 krivulja je oblikovanja potencijala.



Sl. 1.3–1. Razdioba potencija oko uzemljivača.

- Dodirni je napon dio napona uzemljivača koji osoba može premostiti dodirom na udaljenosti od 1 m. Prikazan je na slici 1.3–1.
- Napon koraka dio je napona uzemljivača koji osoba može premostiti korakom duljine 1 m. Prikazan je na slici 1.3–1.
- Ravnomjernije izjednačavanja potencijala postupak je pri izradi uzemljenja, kojim se postiže razdioba napona oko uzemljivača radi smanjenja dodirnog napona U_d i napona koraka U_k (slika 1.3–1 krivulje S_1, S_2 i S_3).

- Zemljospoj je električna vodljiva veza između zemlje odnosno uzemljenog predmeta i vodiča ili dijela postrojenja koji je u redovnom pogonu izoliran i pod naponom prema zemlji.
- Dvostruki ili višestruki zemljospoj istodobni je zemljospoj vodiča dvaju ili više faza jedne elektroenergetske mreže.
- Dozemni je kratki spoj zemljospoj u elektroenergetskoj mreži uzemljenoj izravno ili preko otpora. Za dozemni kratki spoj ili jednopolni kratki spoj, upotrebljavat ćemo pojam zemljospoj.
- Struja je zemljospoja struja koja teče u zemlju na mjestu zemljospoja.
- Kapacitivna struja zemljospoja struja je koja nastaje pri zemljospoju u elektroenergetskoj mreži koja nije uzemljena i zatvara se kroz dozemne kapacitete mreže.
- Preostala struja zemljospoja struja je koja nastaje pri zemljospoju u elektroenergetskoj mreži uzemljenoj preko induktivnog otpora. Induktivnim otporom kompenzira se kapacitativni dio struje zemljospoja.
- Struja dozemnoga kratkog spoja struja je zemljospoja u elektroenergetskoj mreži s izravnim uzemljenjem ili uzemljenjem preko dodatnog otpora za ograničenje struje zemljospoja (obično na 300 A, a rjeđe na 150 A).
- Radno i zaštitno uzemljenje na transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV može biti izvedeno združeno (skupno) tj. kada se oba uzemljenja spajaju na jedan uzemljivač ili odvojeno kako je to prikazano na slici 1.3–2.



Sl. 1.3–2. Odvajanje radnog i zaštitnog uzemljenja kod TS 10(20)/0,4 kV.

- Referentna zemlja (daleka zemlja) je dio zemlje izvan područja utjecaja uzemljivača ili uzemljivačkog sustava gdje se između bilo kojih dviju točaka ne pojavljuje nikakav napon uslijed struje prema zemlji.
- Potencijal uzemljenja jest napon između uzemljivača ili sustava uzemljenja i referentne zemlje.

2. KARAKTERISTIKE TLA

2.1. VRSTE TLA

Kad se uzemljuje neki objekt, pretpostavlja se da je zemlja dobar vodič i da će se preko uzemljivača struja nesmetano dalje kroz nju provesti. Međutim, pri projektiranju nekog uzemljenja otpor uzemljenja vrlo se često razlikuje od onog koji se pojavljuje u stvarnosti. To se događa zbog toga što zemlja nije homogena, već je veoma promjenljiva sastava koji se mijenja od mjesta do mjesta, i s obzirom na dubinu. Osim toga, tlo nije uvijek jednako vlažno, nego se vlažnost mijenja s obzirom na vrijeme i temperaturu, što sve bitno utječe na vodljivost [2].

U elektrotehničkom smislu zemlja se kao vodič karakterizira otporom koji pruža prolasku struje. Taj se otpor naziva otpornost ρ_z, a jedinica kojom se on mjeri je ohm-metar (Ωm). Općenito je otpornost zemlje vrlo visoka prema otporima klasičnih vodiča, npr. prema otporima metala. On za različite vrste tla poprima vrijednosti od nekoliko ohm-metara do nekoliko tisuća ohm-metara. Vrijednost otpornosti za jednu vrstu tla jednako je tako promjenljiva. To se događa zbog toga što je vodljivost struje u zemlji elektrolitske prirode te ovisi o količini disociranih iona, a ta količina opet o rastvorljivosti prisutnih soli i o stupnju vlažnosti tla. Zato se otpornost znatno mijenja s vlažnošću. Ona je to manja što je vlažnost veća, i obrnuto. Utjecaj temperature na vrijednost otpornosti može se zanemariti ukoliko ona nije ispod nule. Međutim, kad temperatura padne znatnije ispod nule i zemljište se zaledi do određene dubine, u našim kontinentalnim uvjetima do dubine oko 50 cm, vodljivost se naglo smanjuje, a otpornost može poprimiti visoke vrijednosti. Mora se stoga u normalnim pogonskim uvjetima računati da se vrijednost otpornosti tla mijenja iz mjeseca u mjesec i da te promjene mogu varirati i do 60 % između najviše i najniže vrijednosti ako se uzmu slojevi zemlje do dubine od 1,5 m. Na većoj dubini te su razlike manje i iznose do 20 %. Zato se preporučuje da se pri projektiranju uzemljenja vodi računa o tim promje-

nama, kao i da se pri izračunu otpora uzemljenja upotrijebi korekcijski faktor veći od 1.

To sve uvjetuje da treba izvršiti analizu tla na kojem se postavlja uzemljivač (naročito za mrežaste ili složene uzemljivače), a po potrebi i mjerenje otpornosti tla ili pak probno iskopavanje s ocjenom vrijednosti otpornosti tla i to na onoj dubini na koju se postavlja uzemljivač. Da bi se saznalo koje vrijednosti otpornosti imaju različite vrste tla, vode i drugih materijala u koje se najčešće ukopavaju uzemljivači, sastavljena je tablica 2.1–1 prema podacima različitih autora.

Tablica 2.1–1. Podaci o otpornosti tla, vode i drugih materijala.

Vrste tla, vode i drugih materijala	Otpornosti ρ_z tla (zemlje), vode i drugih materijala prema literaturi, Ωm						
	[2]	[16]	[23]	[24]	[37]	[35]	[60]
Morska voda	0,5...1	–	0,2...1	–	0,2...0,3	–	–
Voda jezera i rijeka	10...100	–	10...30	–	20...40	–	–
Modra glina	–	–	–	–	–	–	10
Ilovača, crnica, vlažni fini pijesak	–	–	–	100	–	–	–
Glina, ilovača	–	100	–	–	10...60	100	100
Glina vlažnosti 20...40 %	–	–	20...100	–	–	–	–
Zemlja crnica	–	–	50...200	–	–	–	–
Močvarno tlo, lapor, vlažni treset	5...40	30	–	30	–	30	30
Lapor, suhi treset	–	–	–	–	–	–	80
Oranica	90...150	–	–	–	–	100	–
Pjeskovita glina	–	–	–	–	50...60	–	–
Vlažni sitni pijesak	90...150					100	150
Vlažni pijesak	–	200	–	200	–	–	–
Glinasta zemlja, slabe vlažnosti i mješovita zemlja	–	–	120...200	–	–	–	–
Vlažni krupni pijesak (šljunak)	200...400	500	–	–	–	200	200
Suhi sitni pijesak	500	–	–	500	–	500	750
Pijesak slabe vlažnosti	–	–	400...700	–	–	–	–
Suhi krupni pijesak (šljunak)	1000...2000	1000	–	1000	200...6000	1000	1000
Kamenito tlo	100...3000	3000	1000...4000	300	–	3000	3000
Vapno (kompaktno)	500...1000	–	–	–	400...30000	–	–
Vapnenac raspucan, rastrošen (okršen)	–	–	–	–	100...20000	–	–
Beton	150...500	–	–	–	–	–	–
Slojevi stijena i smrznuta zemlja	–	–	1000...45000	–	–	–	–

Otpornost drugih materijala

Temeljni uzemljivač (armirani beton i tlo) [12]: $\rho_z = 50...300$ Ωm.

Bentonit [59]: $\rho_z = 2...8$ Ωm, pH oko 10, sadržaj vlage od 50...80 %.

Crveni mulj [59]: $\rho_z = 20...50$ Ωm, sadrži dio oksida koji su redovni sastojci boksita (Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, TiO_2, CaO) kao i druge elemente u manjim postocima, sadržaj vlage oko 30 %, pH oko 9.

KNJIŽNICA ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA OSIJEK

Računajući na promjenljive okolnosti pri izvođenju uzemljenja, najbolje je prihvatiti ova pravila:

- Kad se ukopava uzemljivač, treba paziti da je ispod površine zemlje najmanje 0,5 m, jer se pretpostavlja da od te dubine dalje tlo oko uzemljivača manje osjeća promjene vlage i temperature i ne zaleđuje se zimi (u našim kontinentalnim uvjetima). U primorskim uvjetima, s obzirom na smrzavanje tla, dopuštena je i manja dubina polaganja uzemljivača, ali se zbog povećanog isušivanja tla ne preporučuje manja dubina od 0,5 m.
- Kad se odabire mjesto za postavljanje uzemljivača, treba izbjegavati one slojeve koji su sastavljeni od šljunka i kamena, jer oni u tlu mogu smanjiti dodirnu površinu uzemljivača s okolišnom zemljom na samo nekoliko mjesta i time znatno povisiti prijelazne otpore i ukupni otpor uzemljenja.
- Trakasti i pločasti uzemljivači polažu se okomito gledajući po duljoj stranici kako bi se smanjio nepovoljan utjecaj slijeganja tla i smanjenja dodirne površine. Razumljivo je da se štapni uzemljivači moraju ukapati okomito.

Da bi se barem donekle popravile te nepovoljne okolnosti, dobro je uzemljivač okružiti slojem zemlje koja nema ni šljunka ni kamena, kako bi se uspostavio što bolji dodir između uzemljivača i okolišnog zemljišta. Nakon ispunjavanja iskopa valja zbiti nasutu zemlju.

2.2. VREDNOVANJE ELEKTRIČNE OTPORNOSTI TLA NA PODRUČJU HRVATSKE

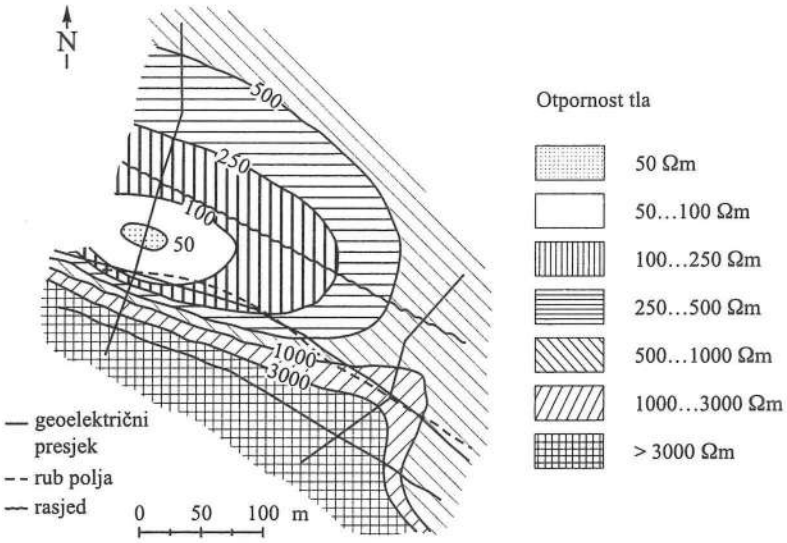
Ovo razmatranje većim je dijelom preuzeto iz literature [37], a detaljniji podaci nalaze se u priloženoj literaturi.

Za projektiranje i izvođenje različitih uzemljivačkih sustava vrlo je važno poznavati otpornost tla u koje će biti smješten uzemljivač. O otpornosti tla ima još uvijek nekih nedoumica koje se odnose na poznavanje vrsta tla i geoloških vodiča. Za pravilno razumijevanje tla u elektrotehniku treba konačno uvesti i bezuvjetno prihvatiti geološko nazivlje, tj. geološke nazive vrsta tla (detaljnije u [37]).

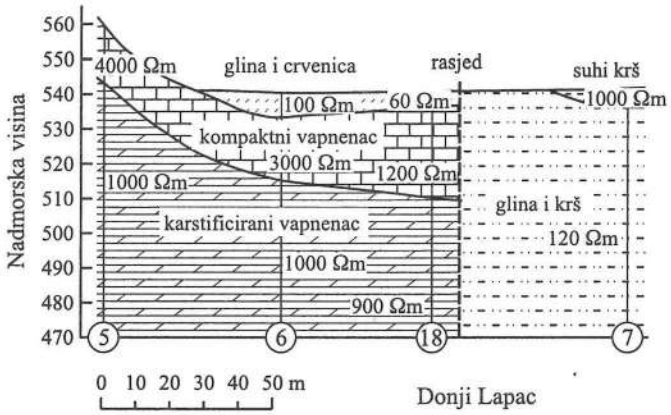
Pod tlom treba shvatiti geološki kompleks stijena (tla) ispod površine Zemlje u užem smislu. Naziv ili pojam *zemlja* (u užem ili širem smislu), što se još uvijek ponekad upotrebljava, nije nikako prikladan i ne valja se njime više koristiti. To treba, dakle, shvatiti i promatrati kao geološki, prostorni, vodič (za razliku od linearnih vodiča).

Posebno treba naglasiti da se za utvrđivanje otpornosti tla najispravnije koristiti postupkom geoelektričnog sondiranja. To više, jer se time osim vrijednosti otpornosti tla utvrđuje debljina i dubina pojedinih naslaga (slojeva) ispod površine zemlje. Tako se mogu utvrditi i pratiti uspravne i vodoravne promjene otpornosti tla. U tu svrhu izvode se geoelektrična sondiranja po presjecima ili sustavu mreže točaka na

određenom prostoru. Kao rezultati tih mjerenja dobivaju se geoelektrično-geološki presjeci tla i karte raspodjele otpornosti tla na određenom području.



Sl. 2.2–1.a) Razdioba otpornosti tla za različite geoelektrične presjeke tla i udaljenosti.



Sl. 2.2–1.b) Geoelektrično-geološki presjek na nadmorskoj visini od 470 do 560 m za određeno područje Donjeg Lapca.

Za ilustraciju vodoravne i uspravne raspodjele otpornosti tla na jednom području prikazana je karta raspodjele otpornosti na slici 2.2–1.a), te geoelektrično-geološki presjek na slici 2.2–1.b). Ta su dva rezultata geoelektričnog sondiranja dobivena iz nekoliko poprečnih i uzdužnih presjeka na području malog krškog polja. Iz slike 2.2–1.a) može se vrlo zorno vidjeti kako se otpornost na maloj udaljenosti može brzo i

jako mijenjati. Vrijednosti otpornosti tla mijenjaju se od 50 do preko 500 Ωm na udaljenosti od oko 120 m u sjevernom dijelu prikazanog područja [37].

Još su veće razlike odnosno brži porasti otpornosti tla u južnom dijelu područja, koje pripada rubnom dijelu krškog polja. U geoelektrično-geološkom presjeku na slici 2.2–1.b) jasno je iskazan diskontinuitet u građi tla u vodoravnom smjeru, što se tumači geološkim rasjedom. Blizu tog rasjeda utvrđene otpornosti kompaktnog i karstificiranog vapnenca nešto su niže od normalne vrijednosti, zbog bočnog utjecaja bolje vodljive sredine od gline i krša.

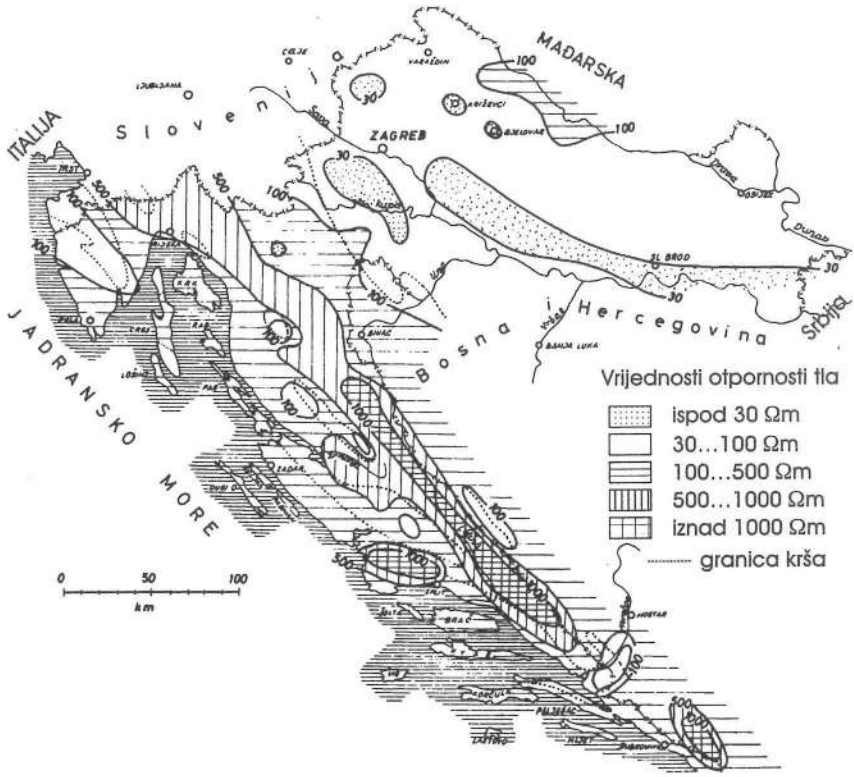
Spomenuti rasjed karakterističan je za većinu krških polja u našem dinaridskom području; dobro vodljivi slojevi (geološki vodiči) gline, lapora, glinovitog pijeska, krša s glinom ili crvenicom nalaze se na rubu polja u dodiru – najčešće uspravnom kontaktu – s visokootpornim karbonatnim stijenama, pretežno vapnencima. Na slici 2.2–1.b) nije prikazan površinski humusni sloj debljine desetak centimetara. Ti rezultati zorno upozoravaju da se ne smije otpornost tla procjenjivati površno, samo pregledom površine tla. Oni s druge strane pokazuju, kako se primjenom geoelektričnog sondiranja može brzo dobiti veoma informativna slika o vodoravnoj i uspravnoj raspodjeli otpornosti tla – odnosno o geoelektrično-geološkoj strukturi podzemlja u određenom području.

Na slici 2.2–3 prikazana je orijentacijska karta otpornosti tla u dubini 1 m za područje Hrvatske. Prema [37] autor je kartu izradio već prije više godina kao poticaj za geoelektrična proučavanja otpornosti tla u Hrvatskoj. Karta je uređena prema podacima dotadašnjih preko 13500 pojedinačnih mjerenja (Geofizika, Zagreb). Budući da točke mjerenja nisu jednolično raspoređene, ta karta daje samo vrlo grubu, orijentacijsku, sliku otpornosti u navedenoj dubini. Kako pokazuje ta karta, može se utvrditi zonska podjela otpornosti tla, što je u skladu s geološko-geografskom građom Hrvatske. Zonska podjela otpornosti naročito je dobro izražena u zapadnom, obalnom dijelu Hrvatske.

Obalno-priobalni dio i dio unutrašnjosti u prostoru Dinarida zauzima oko trećine ukupnog područja Hrvatske. Veći dio tog područja sačinjavaju karbonatne stijene – vapnenci i dolomiti. Te stijene imaju u čvrstom, kompaktnom stanju otpornost veću od 5000 Ωm, a često i do 30000 Ωm. Raspucane i zdrobljene stijene imaju malu otpornost ako se u njihovim pukotinama i šupljinama nalazi voda i crvenica. Samo se na krškim poljima nalaze veće debljine naslage gline, lapora, pijeska i šljunka s malim otpornostima (čak od samo 10...60 Ωm, kod glina, pa do glinovitog pijeska od 60...150 Ωm). Prema geotektonskoj rajonizaciji to područje pripada dinarskom kršu. Morfološki se posebno ističu Učka, cijeli planinski lanac Velebita, Lička Plješivica i Dinara. Površina je tla u kršu veoma heterogena: naizmjence se pojavljuju veći ili manji izdanci stijena, a između njih glina ili crvenica.

Drugu trećinu područja Hrvatske čine područja nižih brda i brežuljaka, gdje dolaze većinom mlađe geološke formacije stijena, karakterizirane manjom otpornošću. Veći dio tog područja nalazi se između područja dinarskog krša na zapadu i ravninskih predjela na istoku, što pripada tzv. panonskoj geotektonskoj jedinici područja Hrvatske. Manji dio sačinjavaju brdoviti predjeli unutar panonskoga ravninskog dije-

la; među njima se posebno ističu masivi Zagrebačke gore, Moslavačke gore i gorja poteza Papuk–Krndija i Psunj–Dilj u Slavoniji.



Sl. 2.2–3. Orijentacijska karta otpornosti tla ρ_z, u dubini 1 m za područje Hrvatske.

Zadnja trećina teritorija Hrvatske otpada na ravničarske predjele gdje dolaze najmlađi geološki sedimenti – pretežno kvartalne naslage. Otpornosti tla ovdje su većinom vrlo niske i najčešće nema problema ni poteškoća u projektiranju i izvođenju uzemljivačkih sustava. Geotektonski to područje pripada panonskom bazenu. Morfološki se posebno ističu široke doline rijeka Save i Drave – Posavina i Podravina.

[L1] Krulc Z.: *Primjena geoelektrične metode geofizičkog ispitivanja u građevinarstvu*, Geološki vjesnik, 12, Zagreb, 1959.

[L2] Krulc Z.: *Geoelektrična mjerenja tla*, Elektrotehnika, IX, 3, Zagreb, 1966.

[L3] Krulc Z.: *Specifični otpor tla. Geoelektrična ispitivanja*, Seminar za projektante i izvođače gromobranske i elektrostatičke zaštite, Referat G/5, Nova Gorica, 1982.

[L4] Fritsch V.: *Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern, besonders in der angewandten Geoelektrik*, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1960.

[L5] Krulc Z.: *Određivanje specifičnog otpora tla geoelektričnim sondiranjem*, Elektrotehnički vjesnik, XVII (XXXI), 3–5, Ljubljana, 1964.

[L6] Krulc Z.: *Doprinos geoelektrike kod projektiranja gromobranskih instalacija i uzemljenja*, II jugoslavensko savetovanje o geoelektricitetu i gromobranima, Referat R-7, Šibenik, 1970.

[L7] Krulc Z.: *Posebne primjene geoelektričnih istraživanja*, Nafta, 28, 5, Zagreb, 1977.

[L8] Vešev A. V. i dr.: *Primenenie elektrorazvedki pri proektirovanii zazemljajuščih ustrojestv v uslovijah složnyh geoelektričeskih razrezov*, VINITI, No. 3134–78, Dep., Leningrad, 1978.

[L9] Volkov V. P. i dr.: *Metodika raščeta godovogo ekonomičeskogo effekta ot vnedrenija v praktiku proektirovanija faktičeskih značenij veličin udeljnyh soprotivlemij grunta*, Har'k. politehn. in-t, Har'kov, 1984.

[L10] Volkov V. P. i dr.: *Postroenie geoelektričeskoj harakteristiki gruntov trassy vozdušnoj linii 1500 kV postojannogo toka Ekibastuz-Centr*. Vesnik Har'k. politehn. in-ta, No. 213, 11–14, Har'kov, 1984.

[L11] Krulc Z.: *Geoelektrična ispitivanja u dinarskom kršu*, Geološki vjesnik, 18/2, Zagreb, 1965.

[L12] Milun S.: *Obrada rezultata geoelektričnog sondiranja nehomogenog tla*, Elektrotehnika, 27, 1–2, Zagreb, 1984.

[L13] Žutobradić S., Filipović-Grčić B.: *Proračun uzemljivača u jednoslojnom i dvoslojnom tlu*, Elektrotehnika, 27, 1–2, Zagreb, 1984.

[L14] Sorić T., Stupnišek-Lisac E.: *Ispitivanje utjecaja različitih vrsta tla na koroziju čeličnih cijevi*, Nafta, 31, 3, Zagreb, 1980.

[L15] Volkowski K.: *Uzemienia urzadzen elektroenergetysznych*, Wydawnictwa naukowo-tehnicyne, Warszawa, 1972.

2.3. SEZONSKE PROMJENE OTPORNOSTI TLA I KOREKCIJSKI KOEFICIJENTI

2.3.1. Korekcijski koeficijent otpornosti tla

Kod određivanja vrijednosti otpornosti tla koji se upotrebljavaju u proračunima potrebno je upozoriti na pojavu sezonskih promjena otpornosti. Sezonske bi se promjene mogle uzeti u obzir tako da se mjerenja protegnu na vrijeme od najmanje jedne godine ili da se obavljaju u vrijeme zaleđivanja i suša. Ako se tako ne postupi, treba ispraviti izmjerene rezultate, tzv. koeficijentom povećanja otpornosti tla K_ρ

$$\rho_z = K_\rho \cdot \rho_{zi} \tag{2.3–1}$$

gdje je:

ρ_z korigirana vrijednost otpornosti tla

ρ_{zi} izmjerena vrijednost otpornosti tla.

Korekcijski koeficijent K_ρ ovisi: o stanju tla na dan mjerenja, o vrsti uzemljivača i o dubini polaganja uzemljivača, te su za određene eksperimentalne podatke, [38] rezultati dani u tablici 2.3–1. Ta tablica pokazuje da tek za slojeve koji su smješteni dublje od 3 m ne treba računati sa sezonskim promjenama otpornosti tla i korekcijskim koeficijentom K_ρ.

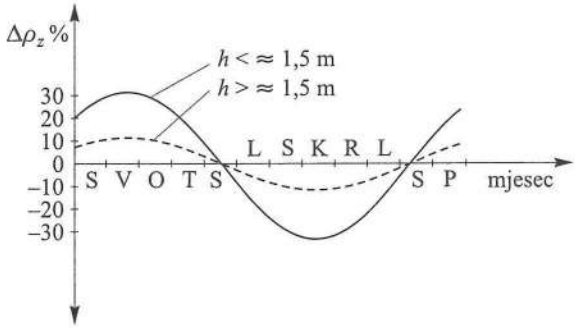
Tablica 2.3–1. Koeficijent korekcije otpornosti tla za različite dubine ukopa uzemljivača.

Tip uzemljivača	Vrijednost korekcijskog koeficijenta K_ρ	
	vlažna zemlja	suha zemlja
Trakasti uzemljivač položen u dubinu od 2,5 m	1,8	1,4
Trakasti uzemljivač položen u dubinu od 0,8...1,0 m	1,45	1,25
Vertikalni uzemljivač položen u dubinu od 2...3 m	1,3	1,15
Dubinski uzemljivač položen u dubinu od 2,5...3 m	1,1	1,0

2.3.2. Utjecaj promjena otpornosti tla na otpor uzemljenja i korekcijski koeficijenti otpora uzemljenja

Otpornost tla promjenjiva je u širokim granicama, a ovisi o sastavu, vlažnosti i temperaturi tla. Zbog negativnoga temperaturnog koeficijenta ($\alpha_1 = -0{,}02\ldots$ $\ldots -0{,}04\ \mathrm{K}^{-1}$) otpornost tla ljeti postiže najnižu vrijednost, naravno ako zemljište nije isušeno. Zbog toga je preporučljivo preračunati rezultate mjerenja otpora uzemljenja na najveći očekivani iznos, zato što se i u nepovoljnim uvjetima (niske temperature) dopušteni dodirni napon ne smije prekoračiti.

Istraživanja su pokazala [L2] da kod uzemljivača koji nisu ukopani dublje od 1,5 m razlika između najvećih i najmanjih vrijednosti otpornosti tla, bez utjecaja naglih pljuskova, iznosi oko 60 %. Kod dublje ukopanih uzemljivača, naročito štapnih, ta razlika iznosi samo oko 20 %, slika 2.3–1.

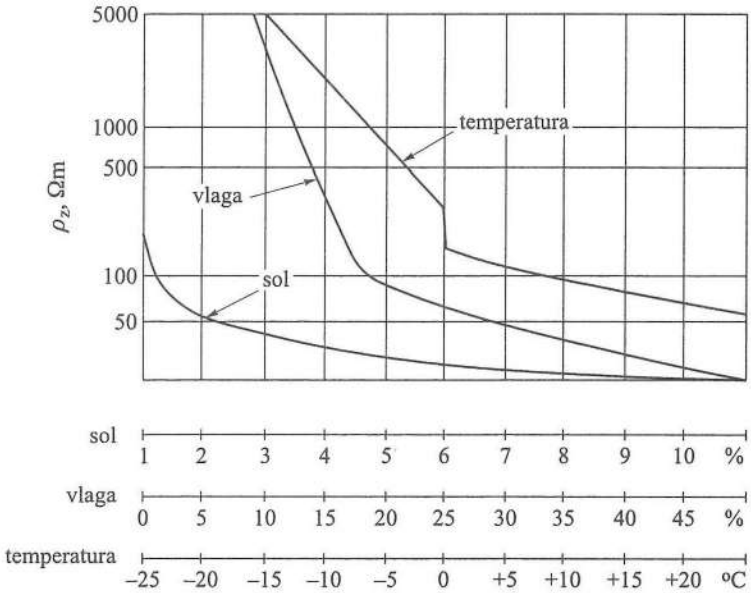


Slika 2.3–1. Promjena otpornosti tla ρ_z u ovisnosti o godišnjem dobu (po mjesecima, bez utjecaja naglih pljuskova).

Zbog približno sinusnog oblika krivulje otpornosti tla, može se izmjereni otpor određenog uzemljivača preračunati na najveću očekivanu vrijednost, kako je to prikazano na slici 2.3–1. Brojna mjerenja na štapnim uzemljivačima duljine 3 m i na trakastim uzemljivačima položenim na dubinu 0,5 m pokazala su da se, uz uvažavanje svih utjecaja, najnepovoljnije moguće vrijednosti dobiju ako se:

- kod štapnih uzemljivača, rezultati mjerenja otpora u vlažnom tlu pomnože s faktorom 3, a rezultati mjerenja u suhom tlu pomnože s faktorom 2
- kod trakastih uzemljivača, rezultati mjerenja otpora u vlažnom tlu pomnože s faktorom 4, a rezultati mjerenja u suhom tlu pomnože s faktorom 2.

Pri mjerenju otpora uzemljenja, naročito pri mjerenju u otežanim uvjetima, potrebno je, pored osnovnih parametara uzemljivača i najviše dopuštene vrijednosti otpora uzemljenja, znati koji je najveći mogući otpor uzemljenja. Zbog toga je potrebno ispraviti izmjerenu vrijednost otpora uzemljenja i odrediti najvišu vrijednost otpora uzemljenja s kojom treba izračunati dodirni napon i napon koraka. Potrebno je uvažiti vremensku promjenu specifičnog otpora tla i utjecaj vlage i soli (u postocima) pri različitim temperaturama tla, kako je to prikazano na slici 2.3–2. Zbog smrzavanja tla uočljiv je nagli porast pri temperaturi manjoj od 0 °C.

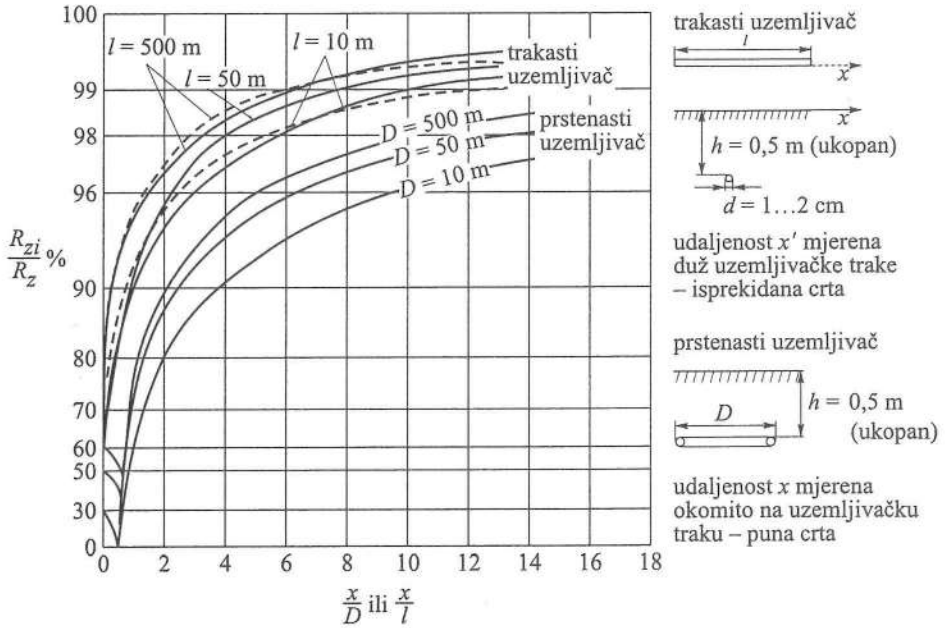


Slika 2.3–2. Ovisnost otpornosti tla ρ_z od postotaka soli, vlage i temperature [32].

Uputno je još koristiti se američkim normama ANSI/IEEE [32] koje prikazuju ovisnost otpornosti tla ρ_z (Ωm) o prisutnosti soli i vlage pri temperaturama tla od –25 °C do +25 °C.

2.3.3. Korekcija mjernih rezultata otpora uzemljenja

Korekciju mjernih rezultata možemo izvršiti upotrebom dijagrama na slici 2.3–3 za prstenasti i trakasti uzemljivač, gdje je dan omjer izmjerene vrijednosti R_{zi}, stvarne vrijednosti otpora uzemljenja R_z u ovisnosti o omjeru udaljenosti x i promjera prstenastog uzemljivača D, odnosno duljine trakastog uzemljivača l.



Sl. 2.3–3. Otpor uzemljenja trakastog i prstenastog uzemljivača u ovisnosti o omjeru x/d ili x/l za određenu duljinu trakastog uzemljivača l i promjer prstenastog uzemljivača D.

Za duljinu trakastog uzemljivača $l = 50$ m i za udaljenost mjerne sonde $x = 100$ m, odnosno $x/l = 100/50 = 2$, iz slike 2.3–3 očitamo $R_{zi}/R_z \cong 95{,}5$ %. Ako je prstenasti uzemljivač promjera $D = 50$ m, za udaljenost mjerne sonde $x = 100$ m, omjer je u m $x/D = 100/50 = 2$, te je vrijednost $R_{zi}/R_z \cong 86$ %.

Za središte prstenastog uzemljivača ($x = 0$) vrijede sljedeće vrijednosti: $R_{zi}/R_z = 61$ % za $D = 500$ m, 51 % za $D = 50$ m i 30 % za $D = 10$ m.

Točnost kojom se otpor uzemljenja može izmjeriti uglavnom ovisi o vrsti i dimenzijama uzemljivača, te o raspoloživim razmacima između uzemljivača, mjerne sonde i pomoćnog uzemljivača. Otpor pomoćnog uzemljivača morao bi biti manji od 100-struke vrijednosti otpora mjerenog uzemljivača. Za točnosti mjerenja od 90, 95 i 99 %, s potrebnim razmacima podaci su navedeni u tablici 2.3–2 [47].

Tablica 2.3–2. Potrebni razmaci za točnost mjerenja 90 %, 95 % i 99 %.

Vrsta uzemljivača	Glavna dimenzija		Razmak od središta uzemljivača do mjerne sonde i od mjerne sonde do pomoćnog uzemljivača kod točnosti od:		
	promjer D, m	duljina l, m	90 %	95 %	99 %
kružnopločasti	–		$3D$	$6D$	$30D$
polukuglasti	–		$5D$	$10D$	$50D$
prstenasti	≈ 10		$3{,}7D$	$7D$	$37D$
	≈ 500		$2D$	$3{,}9D$	$18D$
trakasti poprijeko		10	$0{,}6l$	$1{,}2l$	$10l$
		500	$1{,}1l$	$2{,}5l$	$10l$
trakasti uzdužno		10	$0{,}2l$	$0{,}7l$	$10l$
		500	$0{,}2l$	$0{,}7l$	$10l$
štapni		–	$1l$	$3l$	$15l$

Primjer 2A

Primjerice, želi li se s 95 % točnosti izmjeriti otpor prstenastog uzemljivača promjera $D = 10$ m, potrebni razmaci između uzemljivača i sonde i između sonde i pomoćnog uzemljivača, prema tablici 2.3–2, iznose $l = 7D$, dakle 70 m.

[L1] Wiesenger H.: *Handbuch für Blitzshutz und Brdung*, VDE-Verlag, München, 1982.

[L2] *Odredbe za uzemljenja u postrojenjima izmjenične struje nazivnog napona iznad* 1 kV, VDE 0141/7.76.

2.4. SPECIFIČNA SVOJSTVA GRAĐE TLA

Iz geoelektrično-geoloških presjeka tla mogu se izvući vrlo vrijedni podaci o svojstvima tla kao što je to korozijska agresivnost tla i način zaštite od korozije. To je od posebne važnosti za tlo s malim specifičnim otporom koje u pravilu ima visok stupanj korozijske agresivnosti, i za tlo s velikim specifičnim otporom, gdje se primjenjuju dodatni materijali za poboljšanje vodljivosti tla.

2.4.1. Procjenjivanje korozijske agresivnosti tla

Tlo je vrlo složen sustav, pa korozijska agresivnost tla kao heterogenog sustava ovisi o mnogo različitih fizikalno-kemijskih i hidrogeoloških čimbenika; postoji ovisnost i o klimatskim uvjetima. Bitnim čimbenikom smatra se nehomogenost tla koja

uvjetuje razliku potencijala na granici tlo – metal; kod toga intenzitet procesa korozije metala u mnogome ovisi o specifičnom otporu tla. Zato se u praksi uzima kao osnovni pokazatelj korozijske agresivnosti tla vrijednost otpornosti tla. Opće je osnovno pravilo: tlo s nižom otpornošću smatra se agresivnijim, dok se ono s višom otpornošću smatra manje agresivnim. Može se postaviti i ova funkcionalna veza: ugroženost od korozije obrnuto je proporcionalna otpornosti. Prema rezultatima nedavnih brojnih ispitivanja tla utvrđeno je da je tijek korozije vremenski ubrzan u glinovitim tlima, dok je u pjeskovitim i šljunkovitim tlima tijek korozije usporen. Općenito se smatra da je tlo sa otpornošću manjom od 20 Ωm jako agresivno i da je tlo sa otpornošću većom od 60 Ωm slabo agresivno. U tablici 2.4–1 dan je pregled ovisnosti korozijske agresivnosti tla o otpornosti tla [L4].

Tablica 2.4–1. Pregled ovisnosti korozijske agresivnosti tla o otpornosti tla.

Otpornost tla, Ωm			Stupanj korozijske agresivnosti
SSSR	SAD	ČSSR	
> 100	> 100	25 ... 30	nizak
100 ... 20	100 ... 50	30 ... 10	srednji
20 ... 10	50 ... 23	25 ... 20	povišen
10 ... 5		20 ... 10	
< 5	< 23	< 10	visok

Rezimirajući navedena istraživanja i navode u literaturi [L1 – L6] moguće je definirati sljedeće gradacije za ocjenu korozijske agresivnosti tla:

- vrlo agresivno tlo < 23 Ωm
- umjereno agresivno tlo 23... 50 Ωm
- malo agresivno tlo 50...100 Ωm
- neagresivno tlo > 100 Ωm.

Radi sustavnog proučavanja tla i njegove korozijske agresivnosti treba istraživati i raspodjelu prirodnog električnog potencijala u tlu; to se izvodi postupkom mjerenja prirodnog (spontanog) potencijala tla. Prirodni je potencijal tla potencijal koji se stvara prirodnim putem, postojanjem različitih metala i elektrolita.

Prema ovim geoelektričnim mjernim podacima procjenjuje se korozijska agresivnost tla na određenom području, i može se projektirati zaštita od korozije metalnih instalacija i drugih metalnih objekata predviđenih za ukapanje. Geoelektrična mjerenja prirodnoga električnog potencijala u tlu mogu se izvršiti i u područjima gdje su već položene metalne instalacije objekata radi ocjenjivanja stupnja već eventualno nastale korozije.

Za uzemljivačke sustave posebno ugrožene od korozije treba pravodobno projektirati i izvesti katodnu zaštitu; više o tome u [L5]. Zaključno treba ukazati na vrlo interesantno zapažanje i tvrdnju [L6] da lutajuće izmjenične struje u tlu pobuđuju koroziju. Prema tome treba voditi računa o korozijskoj opasnosti od željezničkih pruga elektrificiranih izmjeničnom strujom.

2.4.2. Zaštita uzemljenja od korozije

Zbog otežanih geografsko-prostornih te fizikalno-kemijskih uvjeta polaganja različitih metalnih predmeta u tlo, naročito u urbanim sredinama, sve se češće javljaju problemi korozije. Pojačanoj koroziji doprinose sve šira područja agresivnog tla zbog veće koncentracije agresivnih čimbenika, promjene fizikalnih i kemijskih uvjeta kao i sve razgranatiji sustavi u tlo ukopanih metalnih objekata i instalacija. Kod uzemljivačkih instalacija dolaze k tome još i do opasnosti od međusobnog spajanja različitih uzemljivača da se ostvari što manji otpor uzemljenja i odgovarajuće izjednačenje potencijala.

[L1] P. Hasse, J. Wiesinger, 1982: *Handbuch für Blitzshutz und Erdung*, 2. Auflage Pflaum Verlag, *VDE – Verlag München.

[L2] Pungerl J.: *Korozija na strelovodnih sistemih*, Bilten 7, Slov. društva za geoel., stst. el. in strelovode, Maribor, Republički komitet za geoelektriku i gromobrane SR Hrvatske, Zagreb, 1983.

[L3] Kršić D., Mrnjec J.: *Elektrokorozija*, dio c) poglavlja 2.2.: Utjecaj prirodnih električnih pojava, u publikaciji: Dvadeset pet godina rada studijskog komiteta za perturbacije 1960 – 1985, CIGRE, Zagreb, 1985.

2.4.3. Problemi zaštite uzemljenja od korozije

Za proces korozije metalnih objekata u tlu već je dobro poznata činjenica da je osnovni uvjet stvaranja galvanskih elemenata kao čimbenika korozije postojanje metala i elektrolitski vodljivo spojenih katoda i anoda. Anode i katode nastaju kao posljedice različitih svojstava metala. Elektroliti su otopine koje se nalaze u porama svih vrsta stijena. Kod korozijskih (galvanskih) elemenata anodna područja imaju uvijek negativniji potencijal metal/elektrolit od katodnih područja.

Najbolji je način za sprečavanje ili smanjenje opasnosti od korozije izbor prikladnih materijala za uzemljivače [L1]. U agresivnom tlu treba dati prednost bakru. *Ako je bakreni uzemljivač preskup*, može se upotrijebiti čelični materijal s bakrenim plaštem. Uzemljivači od bakra ili čelika s plaštem od bakra ne smiju se izravno spajati s uzemljivačima od neplemenitih negativno polarizirajućih metala, kao što je pocinčani čelik (željezo) ili s drugim u tlo položenim čeličnim masama, npr. cjevovodima, cisternama i sl. U primjerima takvih povezivanja treba bakarne elemente zaštiti postupkom katodne zaštite.

Uzemljivači od čelika s plaštem od olova ili uzemljivači od bakra s plaštem od olova mogu se spajati s uzemljivačima od pocinčanog čelika kao i s ostalim čeličnim masama (instalacijama) položenim u tlo. U takvim spojnim mogućnostima ne treba se bojati veće opasnosti od korozije.

Razmjerno je nov način izvođenja uzemljivanja bez većih opasnosti od korozije odnosno sa smanjenom opasnošću od korozije polaganje temeljnog uzemljivača (uzemljivača u temelju). Ta se vrsta uzemljivača sve više upotrebljava širom svijeta kao osnovni ili dopunski uzemljivač. Temeljni uzemljivač ima svakako mnogo duže

trajanje od uzemljivača ukopanog u tlo. On se ne smije izravno spajati s uzemljivačima u tlu od pocinčanog čelika i s drugim pocinčanim čeličnim masama u tlu. Kao uzemljivač u tlu može se u tim slučajevima upotrijebiti samo bakar s plaštem od olova [L1]. Temeljni uzemljivač može se, međutim, spojiti s armaturom u armiranobetonskim objektima.

Ovdje treba ukazati i na radove koji obrađuju problematiku korozije gromobranskih sustava i metalnih konstrukcija [L2, L3].

[L1] P. Hasse, J. Wiesinger, 1982: *Handbuch für Blitzshutz und Erdung*, 2. Auflage Pflaum Verlag, *VDE – Verlag München.

[L2] Cinkler J.: *Mjerenje i kontrola sistema katodne zaštite*, II. jugoslavensko savjetovanje Korozija i zaštita u proizvodnji i transportu nafte i plina, Zrenjanin 1982, Zbornik radova 77 – 80, Zagreb.

[L3] Sorić T. i dr.: *Ispitivanje utjecaja različitih vrsta tla na koroziju čeličnih cijevi*, Nafta, XXXI, 3, Zagreb, 1980.

[L4] Tarhof A. G. (red): *Elektrorazvedka. Spravočnik geofizika*, Nedra, Moskva, 1980.

[L5] Dabić M.: *Korozija metala i katodna zaštita*, Građevinar, XXVI (XCIV), 5, Zagreb, 1974.

[L6] Dabić M.: *Katodna zaštita opreme za eksploataciju podzemnih voda*, Simpozij o istraživanju, eksploataciji i gospodarenju podzemnim vodama, Zbornik radova, 315B – 328B, Zagreb, 1978.

2.5. NAČINI POBOLJŠAVANJA ELEKTRIČNE VODLJIVOSTI TLA

Za poboljšavanje električnih svojstava tla, tj. poboljšavanje električne vodljivosti, danas se uglavnom upotrebljava prirodno sredstvo bentonit ili kemijsko sredstvo vodeno staklo. U našoj literaturi [37], a posebno na nekim savjetovanjima, već je izviješteno o vrlo dobrim rezultatima u primjeni bentonita za smanjivanje specifičnog otpora tla. To se prirodno sredstvo smatra i u nekim drugim zemljama najboljim sredstvom za smanjivanje otpornosti. Od kemijskih sredstava za smanjivanje otpornosti tla može se, prema stranoj literaturi, dati prednost vodenom staklu i natrijskom silikatu, koji pomiješani s vodom (oko 40 dag na 1 litru vode) stvaraju materijal pod nazivom gel. Preporučuje se da se uzemljivač stavlja na sloj gline ili bentonita, a na taj sloj sloj gela vodenog stakla. Dakle, gel ne smije biti u izravnom dodiru s uzemljivačem [L2]. Ne preporučuje se obična sol kao kemijsko sredstvo za smanjivanje otpora tla, zbog stvaranja elektrolita u tlu i pogodovanja koroziji uzemljivača (ionako često slabo pocinčanog).

U literaturi još nema dovoljno podataka o brojčanim pokazateljima smanjivanja otpornosti tla uz primjenu navedenih prirodnih ili kemijskih sredstava. U tom smjeru trebalo bi provesti odgovarajuća ispitivanja i analize [37].

2.5.1. Opća svojstva dodatnih materijala

U nalaženju tehničko-ekonomskog rješenja [59] jedna od mogućnosti je upotreba materijala veće vodljivosti od okolnog terena oko uzemljivačke elektrode. Zbog toga se eksperimentalno istražuju i uspoređuju svojstva sljedećih materijala: bentonit (prah i suspenzija), crveni mulj i namjenski odabrana zemlja.

Osnovna fizičko-kemijska svojstva (sastav i druga zanimljiva svojstva) tih materijala su:

- bentonit, $\rho_z = 2...8\ \Omega m$, pH oko 10, sadržaj vlage 50...80 %, prirodna glina, čiji je osnovni sastav montmorilonit oplemenjen u procesu aktivacije Na_2CO_3 za dobivanje navedenih karakteristika;
- crveni mulj, $\rho_z = 10...30\ \Omega m$, pH = 8...10, sadržaj vlage 20...50 %, nastaje kao ostatak pri preradi boksita u glinicu i u svom sastavu sadrži okside, i to uglavnom aluminija, željeza i silicija;
- odabrana zemlja, $\rho_z \cong 30\ \Omega m$, pH i sadržaj vlage zavisi o izvorištu.

Da bi se sagledala primjena tih materijala, istraživanja su uključila eksperimente na različitim terenima, i to: kraškom terenu, terenu s relativno visokim vrijednostima otpornosti tla (oko 3000 Ωm), pjeskovitom (šljunkovitom) terenu. Na svim poligonima urađeni su istovjetni uzemljivači (trakasti, cijevni i mrežasti) u izvedbi s dodatnim materijalom i klasični bez dodatnog materijala. Mjerene su i uspoređivane karakteristične veličine: otpor uzemljenja, raspodjela napona unutar i izvan mrežastog uzemljivača, kao i usporedni naponi dodira i koraka. O tome više u [59].

2.5.2. Analiza eksperimentalnih istraživanja fizičko-kemijskih svojstava primijenjenih dodatnih materijala [59]

Bentonit je glina u kojoj prevladava mineral montmorilonit, koji je po kemijskom sastavu alumosilikat. Odlikuje se dobrom temperaturnom otpornošću, sposobnošću reverzibilnog upijanja i zadržavanja vlage i mogućnošću zamjene sorbiranih iona u kristalnoj rešetki. Upravo te osobine omogućavaju dobivanje bentonita s otpornošću od 2...8 Ωm, pH oko 10, sadržajem vlage od 50 do 80 %.

Crveni mulj ostatak je pri preradi boksita u glinicu. Sastav, struktura i količina crvenog mulja određeni su kemijskim i mineološkim sastavom boksita kao polazne sirovine. Crveni mulj sadrži dio oksida koji su redovni sastojci boksita (Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, TiO_3, CaO), kao i drugih elemenata u manjim postocima. Prosječne vrijednosti otpornosti crvenog mulja s odležanih deponija iznose 20...50 Ωm, sadržaj vlage oko 30 %, pH oko 9. Vrijednosti otpornosti crvenog mulja variraju ovisno o kakvoći upotrijebljenog boksita, vremenu izlaganja u deponiju i drugim čimbenicima. Razlike u svojstvima crvenog mulja koje iz toga proistječu ne utječu bitno na njegovu primjenu radi poboljšanja karakteristika uzemljivača.

Usporedno s praćenjem električnih karakteristika uzemljivača izgrađenim u kombinaciji s crvenim muljem i bentonitom, praćena su tijekom vremena i osnovna svojstva bentonita i crvenog mulja tako da je uzemljivač otkopavan i uzeti su uzorci. U

laboratoriju su na uzorku mjerene otpornosti, pH i sadržaj vlage, tablica 2.5–1. Usporedno s uzimanjem uzoraka vizualnim je pregledom sagledavano stanje korozijske aktivnosti na samom uzemljivaču.

Tablica 2.5–1. Fizičko-kemijska svojstva uzoraka s eksperimentalnih poligona uzetih u prosincu 1984. godine [59].

Poligon	Vrijeme eksploatacije, god.	Sredina	Otpornost, Ωm	Sadržaj vlage, %	pH 7 %-tnog rastvora
Čule (BiH)	9,5	bentonit suspenzija	5,5	69,0	10
Bjelašnica (BiH)	6,0	bentonit suspenzija	10,7	65,3	9,4
Čitluk (BiH)	4,0	bentonit suspenzija	8,0	42,0	9,6
Maribor (Slovenija)	0,5	bentonit prah	2,3	51,6	10
		bentonit suspenzija	4,2	66,4	9,9
		crveni mulj	11,6	31,0	9,6
	0,4	bentonit prah	4,0	46,5	–
		crveni mulj	27,0	37,1	9,6
	16,0	crveni mulj	–	32,9	9,4
		okolna zemlja	297,0	18,3	< 7
	23	crveni mulj	248	26	9
Varaždin	4,0	bentonit prah	7,0	36,0	–
		bentonit suspenzija	9,0...12,0	28,0	9,3
	0,5	bentonit prah	2,5...3,0	49,0	10
		crveni mulj	12...15	32,0	10
		odabrana zemlja	32,0	19,0	7,6

Sadržaj vlage kod bentonita varira između 36 i 69 %, što svakako ovisi o hidrometeorološkim uvjetima za vrijeme uzimanja uzorka. Kod crvenog mulja izmjeren je sadržaj vlage između 30 i 35 %, što ukazuje da se, zbog prirode samog crvenog mulja, taj sadržaj bitno ne mijenja.

Vrijednost pH, i kod bentonita i kod crvenog mulja, tijekom je čitavog razdoblja izlaganja ostala u približno početnim vrijednostima. Mjerenjem električnih karakteristika uzemljivača dobivena poboljšanja jasno ukazuju da uočene promjene u dodatnim materijalima bitno ne utječu na poboljšanje karakteristika uzemljivača.

U laboratoriju su provedena mjerenja otpornosti tla na temperaturama ispod nule. Nakon dužeg vremena izlaganja otpornost tla postala je veća od 2000 Ωm. Zbog toga se pri izradi uzemljenja treba paziti da se uzemljivači postavljaju na dubine na kojima ne dolazi do zamrzavanja tla.

Usto su provedena laboratorijska istraživanja utjecaja bentonita i crvenog mulja na metale (bakar, željezo, pocinčani čelik). Jednogodišnja ispitivanja utjecaja na metale pokazala su da nema izražajne korozije, tj. da primijenjeni materijali ne djeluju korozivno. Prema Brennerovoj skali [L59] ocjene korozione aktivnosti metala, uzorci od bakra i željeza u bentonit suspenziji pripadaju II. skupini (postojani, mogu se vrlo dobro upotrijebiti), uzorci od pocinčanog čelika III. skupini (postojani, mogu se dobro upotrijebiti), a svi uzorci ispitivani u crvenom mulju pripadaju I. skupini (korozivno otporni). Analiziranjem cijevnog uzemljivača koji je postavljen u Čulama kod Mostara (BiH) sa suspenzijom bentonita potvrđena je postojanost metala u bentonitnoj suspenziji. Utvrdilo se da se korozija pojavila na mjestima gdje nije bilo bentonita, kao i na dodirnim mjestima bentonit – zemlja – zrak, dok na duljini cijevi gdje je bio bentonit i s vanjske i unutarnje strane perforirane cijevi nije uočena pojava korozije.

[L1] Sorić, Stupnišek T., Lisac E.: *Ispitivanje utjecaja različitih vrsta tla na koroziju čeličnih cijevi*, Nafta, Zagreb, 31.03.1980.

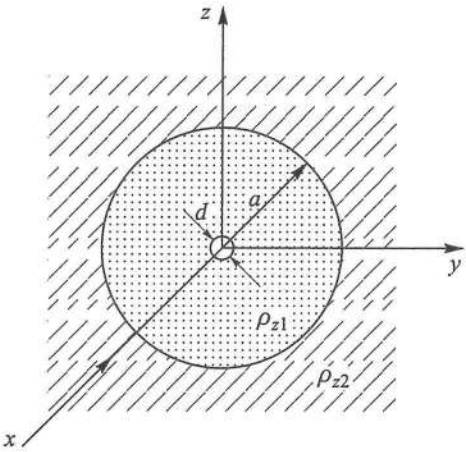
[L2] Wolkowski K.: *Uzemienia urzadzen elektroenergetysznych*, Wydawnictwa navkowo techniczne, Warszawa, 1972.

2.6. UTJECAJ MATERIJALA OKO UZEMLJIVAČA NA PROMJENU OTPORA UZEMLJENJA

Utjecaj materijala koji se stavlja u kanal oko vodiča uzemljivača uzima se u račun kao povećanje promjera vodiča uzemljivača. Ovo povećanje izvodi se iz jednakosti otpora vodiča uzemljivača u nehomogenom tlu i otpora ekvivalentnog vodiča u homogenom tlu. Proračun uzemljivača nastavlja se dalje s povećanim promjerom vodiča [7].

2.6.1. Traka u nehomogenom tlu

Neka je prostor oko trake sastavljen od materijala različitih otpornosti kako je to prikazano na sl. 2.6–1. Pad je potencijala napon U na cilindričnom prostoru otpornosti, ρ_{z1} te iznosi:



d promjer uzemljivača, m

a polumjer oko uzemljivača gdje je tlo otpornosti ρ_{z1}, Ωm

ρ_{z2} otpornost tla izvan valjka promjera $2a$

I_z struja kroz uzemljivač, A

l duljina uzemljivača, m

R_{zc} otpor uzemljenja u cilindričnom kanalu oko trake, Ω

Sl. 2.6–1. Traka u nehomogenom tlu.

$$\Delta V = (V)_{\substack{x=0\\ y=\frac{d}{2}}} - (V)_{\substack{x=0\\ y=a}} = U$$

$$U = \frac{I_z \rho_{z1}}{4\pi l}\left[\ln\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2}+\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2}-\frac{l}{2}}\right)-\ln\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+a^2}+\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+a^2}-\frac{l}{2}}\right)\right] \tag{2.6–1}$$

Slijedi:

$$U = \frac{I_z \rho_{z1}}{4\pi l}\left[\ln\frac{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2}+\left(\frac{l}{2}\right)^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}-\ln\frac{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2+a^2}+\left(\frac{l}{2}\right)^2}{a^2}\right]$$

$$U = \frac{I_z \rho_{z1}}{4\pi l}\left[\ln\left(\frac{\frac{l}{2}+\frac{d^2}{4l}+\frac{l}{2}}{\frac{l}{2}+\frac{d^2}{4l}-\frac{l}{2}}\right)-\ln\left(\frac{\frac{l}{2}+\frac{a^2}{l}+\frac{l}{2}}{\frac{l}{2}+\frac{a^2}{l}-\frac{l}{2}}\right)\right]=\frac{I_z \rho_{z1}}{4\pi l}\left(\ln\frac{l}{\frac{d^2}{4l}}-\ln\frac{l}{\frac{a^2}{l}}\right)$$

$$U = \frac{I_z \rho_{z1}}{4\pi l}\left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right)^2-\ln\left(\frac{2l}{2a}\right)^2\right]$$

$$U = \frac{I_z \rho_{z1}}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d}-\ln\frac{2l}{2a}\right] \tag{2.6–2}$$

Otpor materijala u cilindričnom kanalu oko trake iznosi:

$$R_{z1} = \frac{U}{I_z} = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} - \ln\frac{2l}{2a}\right] \tag{2.6–3}$$

Prvi član je otpor vodiča promjera d koji se nalazi u sredstvu ρ_{z1}. Drugi je član otpor prostora izvan radijusa a koji ima otpornost ρ_{z2}. Razlika ovih dvaju otpora je otpor prvog cilindra:

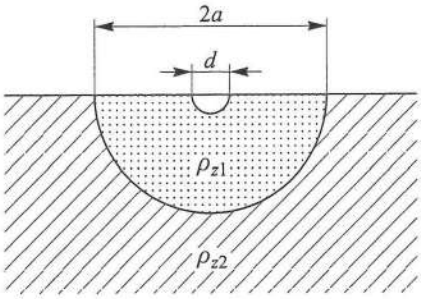
$$R_{z1} = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l}\ln\frac{2l}{d} \tag{2.6–4}$$

Otpor preostalog dijela iznosi:

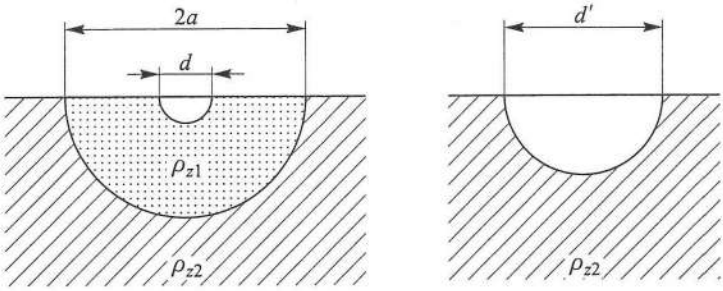
$$R_{z2} = \frac{\rho_{z2}}{2\pi l}\ln\frac{2l}{2a} \tag{2.6–5}$$

Ukupni otpor uzemljivača u dvoslojnom tlu jednak je zbroju ova dva otpora, te je:

$$R_{uz} = \frac{1}{2\pi l}\left(\rho_{z1}\ln\frac{2a}{d} + \rho_{z2}\ln\frac{2l}{2a}\right) \tag{2.6–6}$$



Sl. 2.6–2. Traka na površini nehomogenog tla.



Sl. 2.6–3. Uvođenje ekvivalentnog vodiča promjera d'.

Za konfiguraciju prema sl. 2.6–2 otpor je dvostruko veći. Jednak otpor imao bi vodič u sredstvu 2 promjera d', slika 2.6–3:

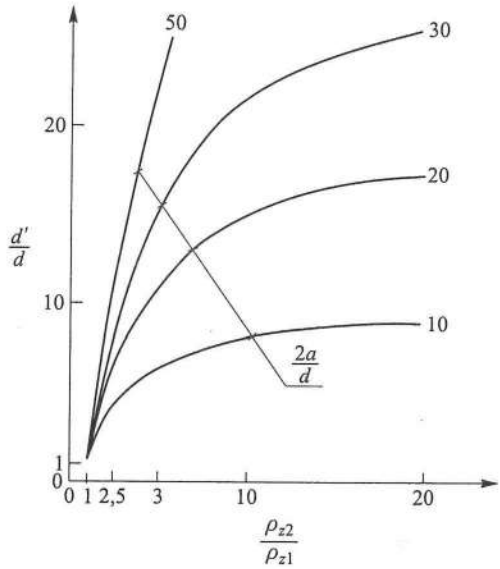
$$R_{uz} = \frac{1}{2\pi l}\left(\rho_{z1}\ln\frac{2a}{d} + \rho_{z2}\ln\frac{2l}{2a}\right) = \frac{1}{2\pi l}\rho_{z2}\ln\frac{2l}{d'} \qquad (2.6\text{–}7)$$

te je:

$$\frac{d'}{d} = \left(\frac{2a}{d}\right)^{1-\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}} \qquad (2.6\text{–}8)$$

Ekvivalentni vodič promjera d' ne mijenja električno polje u tlu otpornosti ρ_{z2}, tj. u tlu izvan kanala jer je raspodjela potencijala stvarnog i ekvivalentnog vodiča jednaka. Prema tome ne mijenja se ni dodirni napon ni napon koraka.

Na slici 2.6–4 dana je ovisnost relativnog i stvarnog promjera d'/d o omjeru ρ_{z2}/ρ_{z1}. Slika zorno prikazuje utjecaj materijala koji se postavlja oko vodiča uzemljivača na povećanje promjera ekvivalentnog vodiča a time i na smanjenje otpora uzemljenja.



Sl. 2.6–4. Ovisnost d'/d o ρ_{z2}/ρ_{z1} za omjere $2a/d$ = 10, 20, 30 i 50 [7].

2.7. MJERENJE OTPORNOSTI TLA U DVOSLOJNOM TLU S POMOĆU PROBNE SONDE

Poznavanje otpornosti površinskih slojeva tla potrebno je radi određivanja dodirnog napona i napona koraka [52]. Spomenuta svojstva tla u praksi se obično određuju primjenom Venerove (Wenner) metode četiriju sonda [L1]. Na moguće teškoće s tom metodom ukazano je u [L2]. Mjerenja na modelu u elektrolitičkoj kadi pokazala su da kod dvoslojnog tla razmak sondi pri mjerenjima mora varirati u vrlo širokom

opsegu, da bi se mogle dovoljno točno odrediti otpornosti slojeva i debljina gornjeg sloja [L3]. Spomenuti opseg prostire se od vrijednosti koje trebaju biti nekoliko puta manje od debljine gornjeg sloja do vrijednosti koje su nekoliko puta veće od te debljine.

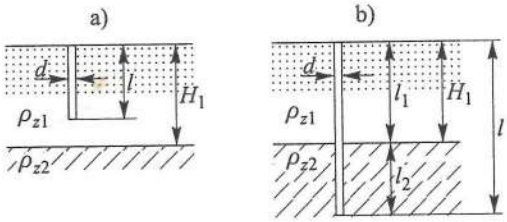
Metoda s jednom sondom alternativna je metoda za određivanje svojstava tla [L2 – L5]. Metoda se zasniva na mjerenjima otpora uzemljenja uspravne probne sonde, koja se pobija na različite dubine, postupno tijekom eksperimenta. U obradi rezultata mjerenja sondom upotrebljava se približna relacija za otpor uzemljenja vertikalne sonde u dvoslojnom tlu [L2 – L6]. Za to su razvijeni i računalni programi koji, prema izmjerenim vrijednostima otpora uzemljenja sonde, automatski nalaze dvoslojni model tla koji se najbolje uklapa u eksperimentalne rezultate.

Predložene su aproksimativne relacije za proračun otpora uzemljenja vertikalne sonde u dvoslojnom tlu u različitim uvjetima. Na osnovi tih relacija, objašnjena je jednostavna metoda za obradu rezultata mjerenja otpora probne sonde radi određivanja električnih svojstava tla, koja predstavlja poboljšanje poznatih praktičnih metoda [L2 – L5]. Građa u ovom poglavlju preuzeta je iz [52] gdje se može vidjeti detaljnija obrada ove materije.

2.7.1. Približni izrazi za otpor uzemljenja okomite sonde u dvoslojnom tlu

Kako su pokazale računske analize, kod proračuna otpora uzemljenja vertikalne sonde u dvoslojnom tlu treba razlikovati sljedeće slučajeve, slika 2.7–1:

a) sonda se nalazi samo u gornjem sloju (u homogenom tlu)
b) sonda se nalazi samo u donjem sloju i
c) sonda se nalazi u oba sloja (u dvoslojnom tlu).



Sl. 2.7–1. Položaj probne sonde a) sonda se nalazi samo u gornjem sloju ($l \leq H_1$), b) sonda se nalazi se u oba sloja ($l > H_1$).

U slučaju a) za proračun otpora uzemljenja može se upotrijebiti izraz koji bi vrijedio da se sonda nalazi u homogenom tlu sa otpornošću tla gornjeg sloja ρ_{z1}:

$$R_z = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l}\ln\left(\frac{4l}{d}\right) = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l}\ln(kl) \qquad (2.7\text{–}1)$$

Faktor k ovisi o usvojenom modelu sonde. Za elipsoidni model:

$$k = \frac{4}{d} \tag{2.7–2a}$$

a za cilindrični model:

$$k = \frac{8}{ld} \tag{2.7–2b}$$

gdje je:

ρ_{z2} otpornost tla donjeg sloja, Ωm
ρ_{z1} otpornost tla gornjeg sloja, Ωm
d promjer sonde, m
l duljina ukopanog dijela sonde, m
H_1 debljina gornjeg sloja, m
l_2 duljina sonde u donjem sloju, m
ρ_{za} ekvivalentna otpornost dvoslojnog tla, Ωm.

Modeli daju neznatno različite rezultate, jer su vrijednosti k dosta bliske u argumentu logaritamske funkcije.

U slučaju b) dobra se aproksimacija za otpor uzemljenja sonde dobiva primjenom formule:

$$R_z = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l} \ln\left[kl \left(\frac{\rho_{z2}}{\rho_{z1}} \right)^{\frac{1}{H_1}} \right] \tag{2.7–3}$$

$$R_z = \frac{\rho_{z1}}{2\pi l} \ln(kl) + \frac{\rho_{z1}}{2\pi H} \ln\left(\frac{\rho_{z2}}{\rho_{z1}} \right) \tag{2.7–4}$$

Za slučaj c) utvrđeno je da neovisno o odnosu ρ_{z1} i ρ_{z2} dobre rezultate daje formula:

$$\rho_{za} = \rho_{z2} \frac{l}{l_a} \tag{2.7–5}$$

gdje je:

l_a ekvivalentna duljina ukopavanja sonde u dvoslojno tlo, ako je sonda ukopana u oba sloja

ili u drugom obliku:

$$l_a = l_2 + \frac{\rho_{z2}}{\rho_{z1}} \cdot l_1 \tag{2.7–6}$$

$$R_z = \frac{\rho_{za}}{2\pi l} \ln(kl_a) \tag{2.7–7}$$

Upotrebom (2.7–7) formula (2.7–5) poprima oblik:

$$R_z = \frac{\rho_{z2}}{2\pi l_a} \ln(kl_a) \tag{2.7–8}$$

Tablica 2.7–1. Izračun otpora uzemljenja točnom metodom (primjenom programa za računalo) [52] i omjer otpora uzemljenja izračunat točnom metodom R'_z i približnom metodom R_z upotrebom formula (2.7–1) i (2.7–3). Za $d = 0{,}0635$ m, $H_1 = 2$ m i $\rho_{z1} = 100$ Ωm.

l/H_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 0{,}1$					
R'_z (Ω)	213,598	141,857	110,132	91,944	80,057	71,669	65,285	60,578	57,021	54,857
R'_z (prema 2.7–3)/R_z	1,030	1,034	1,041	1,047	1,053	1,056	1,054	1,060	1,055	1,036
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 0{,}2$					
R'_z (Ω)	208,791	137,036	105,503	87,095	75,181	66,756	60,324	55,552	51,896	49,506
R'_z (prema 2.7–3)/R_z	1,027	1,030	1,037	1,042	1,047	1,051	1,056	1,057	1,053	1,036
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 5$					
R'_z (Ω)	195,997	124,187	92,360	74,012	61,903	53,216	46,430	41,158	36,740	32,475
R'_z (prema 2.7–1)/R_z	1,029	1,034	1,043	1,054	1,065	1,078	1,097	1,115	1,139	1,185
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 10$					
R'_z (Ω)	195,308	123,493	91,652	73,291	61,153	52,449	45,627	40,305	35,797	31,333
R'_z (prema 2.7–1)/R_z	1,032	1,040	1,051	1,064	1,078	1,093	1,116	1,138	1,169	1,228
l/H_1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 0{,}1$					
R'_z (Ω)	54,607	54,289	53,957	53,611	53,250	52,902	52,554	52,160	51,800	51,441
R'_z (prema 2.7–7)/R_z	1,031	1,029	1,026	1,024	1,022	1,021	1,020	1,019	1,018	1,017
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 0{,}2$					
R'_z (Ω)	48,967	48,359	47,735	47,106	46,478	45,858	45,259	44,598	44,005	43,434
R'_z (prema 2.7–7)/R_z	1,030	1,026	1,023	1,020	1,018	1,016	1,014	1,014	1,013	1,012
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 5$					
R'_z (Ω)	19,679	15,764	13,286	11,444	10,244	9,231	8,400	7,715	7,153	6,673
R'_z (prema 2.7–7)/R_z	0,979	0,989	0,993	0,994	0,994	0,994	0,996	0,998	0,997	0,977
					$\rho_{z1}/\rho_{z2} = 10$					
R'_z (Ω)	13,106	9,729	7,850	6,632	5,768	5,121	4,404	4,193	3,858	3,577
R'_z (prema 2.7–7)/R_z	0,980	0,990	0,993	0,994	0,995	0,994	0,997	0,998	0,997	0,977

Valjanost formula (2.7–1), (2.7–3) i (2.7–5) provjerena je usporedbom s točnim proračunom otpora uzemljenja probne sonde, R'_z primjenom programa za računalo [L7], tablica (2.7–1). U približnim formulama korišteno je k za elipsoidni model sonde ($k = 8/l \cdot d$). Kako se vidi, približne relacije daju zadovoljavajuće vrijednosti otpora uzemljenja sonde u svim razmatranim slučajevima.

2.7.2. Obrada rezultata mjerenja

a) Izračunavanje otpornosti gornjeg sloja ρ_{z1} i njegove debljine H_1, ako je $\rho_{z2} < \rho_{z1}$.

Probna sonda zabija se u tlo s malim korakom Δl (npr. reda 0,1 m). Za svaku ukopanu duljinu sonde l mjeri se otpor uzemljenja R_z. Metoda obrade izmjerenih vrijednosti R_z treba omogućiti određivanje otpornosti gornjeg sloja ρ_{z1}, njegove debljine H_1 i otpornosti nižeg sloja ρ_{z2}.

Spomenuti parametri mogu se odrediti s pomoću formula navedenih u točki 2.7.2. Iz (2.7–1.) slijedi:

$$\rho_{z1} = \frac{2\pi l R_z}{\ln(kl)} \qquad (2.7\text{–}9)$$

Upotrebom (2.7–9) izračunava se ρ_{z1} za uzastopne vrijednosti duljine sonde:

$$l_{i+1} = l_i + \Delta l \quad (i = 1, 2, 3, \ldots) \qquad (2.7\text{–}10)$$

Formula (2.7–9) daje za sve vrijednosti približno iste vrijednosti ρ_{z1}. Za ρ_{z1} najbolje je usvojiti neku od vrijednosti dobivenih pri početnim mjerenjima ili srednju vrijednost početnih mjerenja. Time se izbjegava blagi utjecaj nižeg sloja koji ipak postoji. Pri prelasku u niži sloj dolazi do naglog smanjivanja ρ_{z1} računatog prema (2.7–9). Debljina gornjeg sloja H_1 praktično je jednaka dubini sonde iz prethodnog mjerenja.

b) Izračunavanje otpornosti gornjeg sloja ρ_{z1} i njegove debljine H_1 ako je $\rho_{z1} > \rho_{z2}$, $l \ll H_1$

Ovo je situacija kod prvih mjerenja, te se iz (2.7–1) može izračunati otpornost tla gornjeg sloja:

$$\rho_{z1} = \frac{2\pi l R_z}{\ln(kl)} \qquad (2.7\text{–}11)$$

Iz formule (2.7–3) zaključujemo da pri porastu duljine ukopa sonde l utjecaj donjeg sloja na vrijednost otpornosti tla gornjeg sloja ρ_{z1} može biti značajan.

S obzirom da probnu sondu zabijamo u malim koracima Δl (npr. po 0,1 m) izračunavanjem otpornosti tla gornjeg sloja ρ_{z1} po formuli (2.7–11) može se skokovitom promjenom otpora ρ_{z1} utvrditi prelazak mjerne sonde u donji sloj ρ_{z2}.

c) Izračunavanje otpornosti tla donjeg sloja ρ_{z2}

Iz (2.7–6) izračuna se ρ_{z2}:

$$\rho_{z2} = \frac{l_a - l_2}{l_1}\rho_{z1} \qquad (2.7\text{–}12)$$

za $l_1 = H_1$

$$\rho_{z2} = \frac{l_a - l_2}{h}\rho_{z1}$$

te se upotrebom (2.7–5) dobije:

$$R_z = \left(1 - \frac{l_2}{l_a}\right)\frac{\rho_{z1}}{2\pi H_1}\ln\left(kl_a\right) \tag{2.7–13}$$

Ako se uvede relativna vrijednost r_z je:

$$r_z = \left(1 - \frac{l_2}{l_a}\right)\ln(kl_a), \tag{2.7–14}$$

iz (2.7–13) dobije se:

$$R_z = \frac{r_z \rho_{z1}}{2\pi H_1} \tag{2.7–15}$$

Iz (2.7–15) može se za poznate vrijednosti R_z, H_1 i l odrediti ρ_{z1} po postupku:

- izmjeri se R_z te iz (2.7–14) izračuna r_z
- za poznate vrijednosti r_z i $l_2 = l - H_1$ iz (2.7–15) izračun kl_a i l_a
- iz (2.7–12) se izračuna ρ_{z2}
- ako je sonda došla do granice gornjeg i donjeg sloja, vrijedi $l_1 = H_1$.

Pri proračunu gornjih veličina treba, provjere radi, izračun izraditi za nekoliko dubina sonde. Pri tim kontrolnim proračunima treba dobiti približno jednake vrijednosti otpornosti tla ρ_{z2}. Kao točna vrijednost može se usvojiti srednja vrijednost za nekoliko dubina sonde.

[L1] Tagg G. F.: *Earth Resistances*, G. Newnes, 1964.

[L2] Blattner C. J.: *Study of driven Ground Rods an Four.*

[L3] Caldecot R., Kasten O. G., Minkara S.: *Investigation of Soil Resistivity Measuring Techniques Using an Electrolitic Tank.*

[L5] Koch W.: *Erdungen in Wechselstromanlangen über 1 kV*, Springer V., 1961.

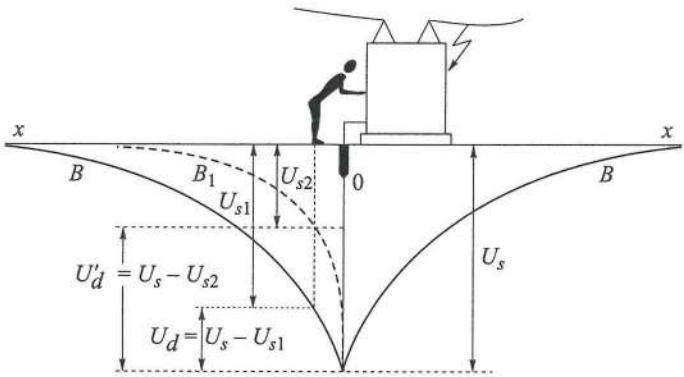
[L6] Ebin L. E., Jacobs A. I.: *Rasčot zazemljenij v gruntah s neodnorodnimi električeskimi parametrami*, Električestvo, 1961.

[L7] Nahman J.: *Digital Calculation of Earthing Systems in Nonuniform Soil*, Archiv für Eltech., Vol. 62, pp19 – 24.

3. DODIRNI NAPON I NAPON KORAKA I KRITERIJI ZAŠTITE OD ELEKTRIČNOG UDARA

3.1. RASPODJELA POTENCIJALA, NAPON KORAKA I DODIRNI NAPON

Ukupni otpor rasprostiranja prolasku struje od uzemljivača kroz zemlju jednak je zbroju otpora pojedinih slojeva tla koje okružuje uzemljivač. Slojevi tla bliže uzemljivaču pružaju struji veći otpor od onih udaljenijih (zbog manjeg presjeka). Zbog toga prvi slojevi troše veći dio ukupnog napona od onih koji su udaljeniji od uzemljivača. Raspodjela potencijala oko uzemljivača, slika 3.1–1, može se prikazati krivuljom B ili još strmijom krivuljom B_1. Potencijal je to manji što je udaljenost od uzemljivača veća.



Sl. 3.1–1. Raspodjela potencijala oko uzemljivača i dodirni napon.

Čovjek koji bi stajao na udaljenosti jedan metar od zaštićenog objekta i koji bi rukom dotaknuo zaštićeni objekt kroz čiji uzemljivač taj čas teče struja, bio bi zahvaćen razlikom potencijala:

$$U_d = U_s - U_{s1} \tag{3.1–1}$$

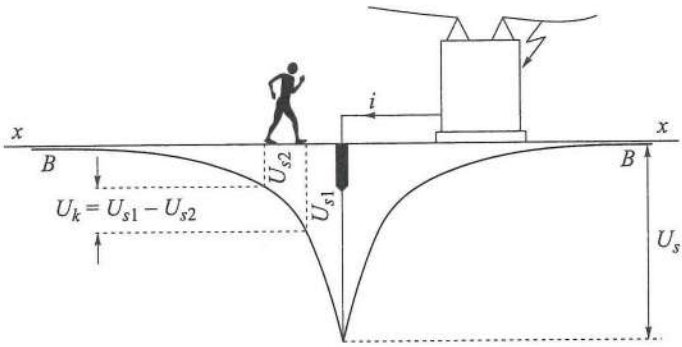
ako je raspodjela potencijala po krivulji B.

Takva razlika potencijala može biti vrlo opasna za čovjeka, bilo da je dodirni napon ili napon koraka. To ovisi o strmini krivulje raspodjele potencijala. Ako je raspodjela potencijala po strmijoj krivulji B_1, što upućuje na to da se još veći dio ukupnog napona U_s troši sasvim blizu uzemljivača, tada je dodirni napon još veći:

$$U'_d = U_s - U_{s2}. \tag{3.1–2}$$

Za što veću čovjekovu sigurnost za uzemljivače se još postavlja zahtjev da svojom konstrukcijom i oblikom smanjuju razliku napona koja bi se mogla pojaviti između njegovih nogu kada on hoda po površini tla u vrijeme provođenja struje. Ta razlika napona naziv se *napon koraka*, slika 3.1–2. Ako je krivulja raspodjele potencijala oko uzemljivača B, čovjekova je lijeva noga na potencijalu U_{s1} a desna na potencijalu U_{s2}, a čovjek se nalazi pod naponom koraka:

$$U_k = U_{s1} - U_{s2} \tag{3.1–3}$$



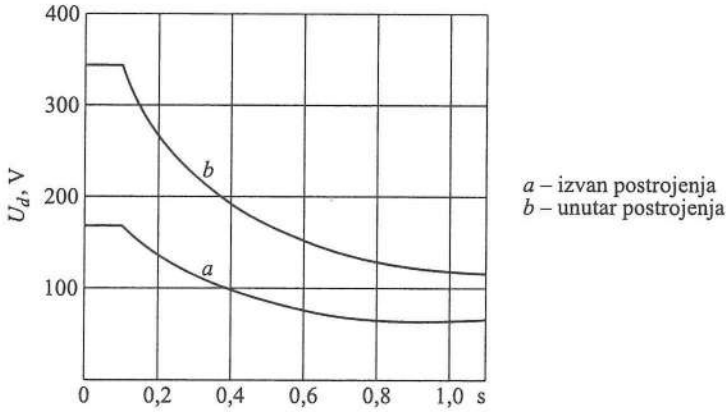
Sl. 3.1–2. Raspodjela potencijala oko uzemljivača i napon koraka.

Iz slike se zapaža da je napon koraka to veći što se čovjek kreće bliže uzemljivaču. To je razumljivo kad se zna da će svojim korakom (koji u praksi uzimamo da iznosi jedan metar) premostiti veće razlike potencijala.

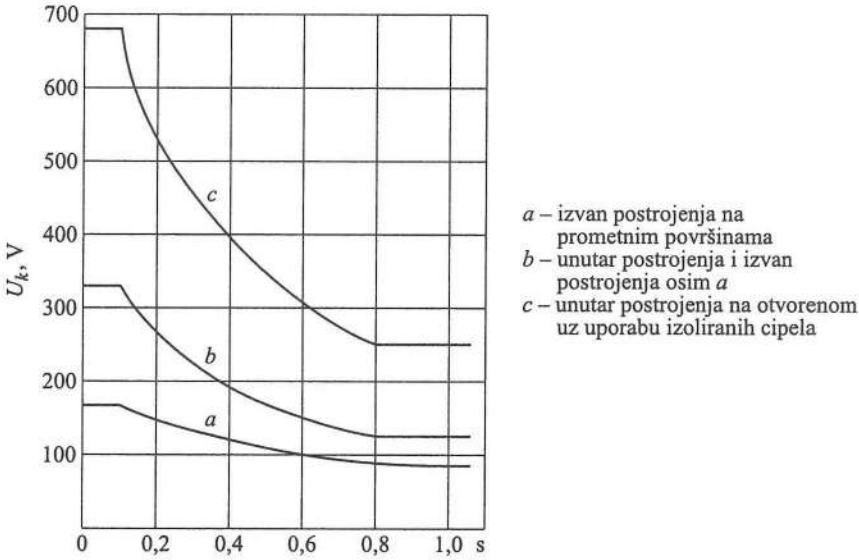
Veličina napona koraka i dodirnog napona ovisi o iznosu struje koja teče kroz zemlju, zatim o otporu uzemljenja R_z i krivulji raspodjele potencijala. Dodirni napon i napon koraka koji su opasni za čovjeka, mogu se svesti na neopasnu vrijednost ako se smanji otpor uzemljenja R_z i tako ostvari manje strma raspodjela potencijala. Međutim, to nije uvijek lako postići. Taj otpor ne ovisi samo o obliku, dimenzijama i broju uzemljivača, nego znatno i o strukturi zemljišta, tj. o otpornosti zemljišta u koje su uzemljivači ukopani.

Napon uzemljivača U_s definira se kao razlika potencijala uzemljivača, koji nastaje prolaskom struje kroz otpor uzemljivača ($V_z = I_z \cdot R_z$), i potencijala zanemarive vrijednosti V_0 pri naponskom lijevku raspodjele potencijala. On se u praksi uzima da iznosi ≤ 5 % potencijala uzemljivača V_z. Dakle, $U_s = V_z - V_0$.

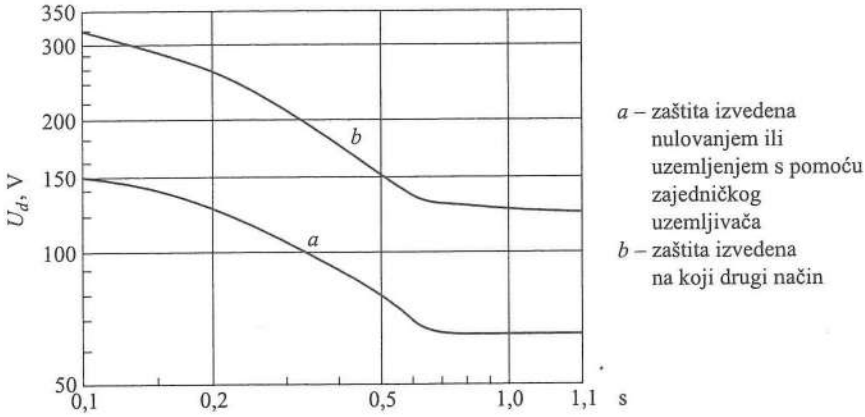
Preko uzemljivača protječe u zemlju izmjenična ili istosmjerna struja, i to obično u slučaju kvara, a katkada je to i obvezatni dio strujnog kruga. To se događa primjerice, ako se uzemljuju nul-točke transformatora, generatora i sl. u elektroenergetskim sustavima, tj. u primjeru pogonskog (radnog) uzemljenja.



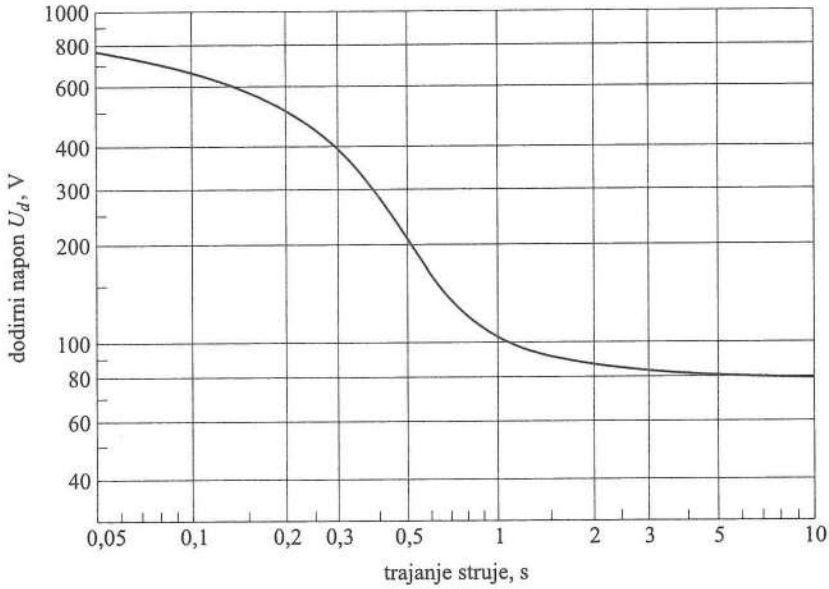
Sl. 3.1–3. Dopušteni dodirni napon U_d u ovisnosti o trajanju zemljospoja prema propisima [1].



Sl. 3.1–4. Dopušteni napon koraka U_k u ovisnosti o trajanju zemljospoja prema propisima [1].



Sl. 3.1–5. Dopušteni dodirni napon U_d za niskonaponske mreže i instalacije u ovisnosti o trajanju kvara (zamljospoja) [41].



Sl. 3.1–6. Dopušteni dodirni naponi U_d u ovisnosti o trajanju struje prema normi HD 637 S1:1999.

Dopušteni dodirni napon i napon koraka u ovisnosti o trajanju struje kroz uzemljivač prikazani su prema [1] i [16] na slici 3.1–3 i 3.1–4. Za vrijeme protjecanja struje kroz uzemljivač uzima se vrijeme na koje je postavljena zemljospojna zaštita na promatranom vodu.

Dopušteni dodirni napon U_d za niskonaponske mreže i instalacije u ovisnosti o trajanju kvara i vrsti zaštite u električnoj instalaciji od indirektnog dodira (krivulja *a* ili *b*) i o trajanju kvara kvara prema [41] prikazan je na slici 3.1–5.

Dopušteni dodirni napon U_d u visokonaponskim sustavima u ovisnosti od trajanju struje, prema normi HD 637 S1:1999 prikazan je na slici 3.1–6. Ako je trajanje struje mnogo dulje od 10 s, može se za U_d primijeniti vrijednost 75 V.

Uvijek treba nastojati da je otpor uzemljenja za izmjenične i istosmjerne struje i struje munje što manji, jer se tako mogu izbjeći štetne posljedice za čovjeka i za objekte u okolici. Ako smanjenje otpora uzemljenja nije moguće postići, treba dimenzijama, oblikom i rasporedom uzemljivača nastojati da se barem na određenim kritičnim mjestima ne stvaraju velike razlike napona, posebno ondje kuda se kreću ljudi.

Pojmovi dodirni napon i napon koraka te njihove definicije primjenjivi su u praksi samo kod odvođenja u zemlju izmjenične ili istosmjerne struje. Naime veličine su tih struja pod čovjekovim nadzorom jer su iz elektroenergetskog sustava. Kod odvođenja u zemlju struje munje, koju čovjek ne može nadzirati, te je njezina jakost nepoznata, pojmovi dodirni napon i napon koraka imaju samo orijentacijsko značenje, a rezultate računanja treba prihvatiti uz stanoviti oprez.

Iznos struje koja protječe kroz metalne predmete u zemlji do uzemljivača i kroz sam uzemljivač ovisi o načinu uzemljenja nul-točke mreže. Prolazom struje kroz uzemljivač u zemlju dolazi površina zemlje na potencijal (naravno da to vrijedi i za slojeve ispod površine, ali za zaštitu su važne prilike na površini zemlje), pa između pojedinih točaka vlada razlika potencijala. Oblik i razmak ekvipotencijalnih ploha oko uzemljivača ovisi o obliku uzemljivača i o otpornosti zemlje, dok je potencijal uzemljivača jednak umnošku struje kroz uzemljivač i otpora uzemljenja. Detaljnija obrada navedena je u literaturi [2], [46], [48].

3.2. ZAŠTITA OD ELEKTRIČNOG UDARA

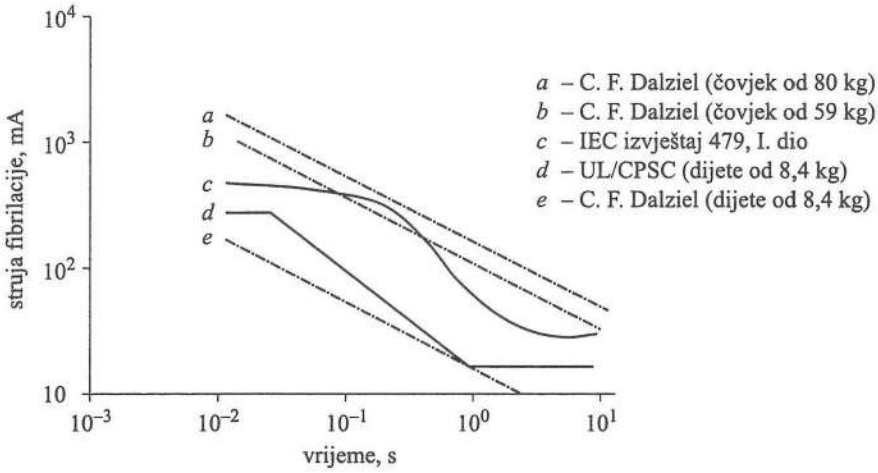
Ovo poglavlje većim je dijelom preuzeto iz literature [48], a detaljniji se podaci nalaze u priloženoj literaturi.

Postavljanje zahtjeva na uzemljenje zahtijeva utvrđivanje kriterija zaštite od električnog udara. Međutim, unatoč veoma opsežnim istraživanjima koja su provedena do danas u području fiziologije električnog udara i određivanja impedancije čovječjeg tijela, još uvijek postoje neke nejasnoće u vezi s kriterijima zaštite i normi, [L1]. Razumijevanje, proračunavanje i izgradnja uzemljivačkog sustava mogući su samo ako se na odgovarajući način uzmu u razmatranje električna svojstva čovječjeg tijela.

Uspostavljanje veze između fiziologije električnog udara i impedancije tijela na današnjem stupnju spoznaje nije jednoznačno. Najveći dio podataka za rješenje te zadaće prikupljen je u pokusima sa životinjama. Manji dio podataka dobiven je analizom slučajeva smrti i ranjavanja ljudi električnom strujom i eksperimentiranjem s ljudskim leševima. Prema tome, svi se današnji kriteriji zaštite temelje na interpolacijama i ekstrapolacijama podataka dobivenih iz tih pokusa. Osnovni je cilj, zapravo, izgraditi nadomjesnu mrežu koja vjerno odražava električna svojstva čovječjeg tijela u svim uvjetima djelovanja vanjskog izvora. U vezi s tim zadatkom susrećemo se s brojnim dvojbama, što se odražava i na kriterije zaštite od dodirnog napona i napona koraka. To se odražava i u nacionalnim normama, iako su one osnova juridičkih odredbi.

Razmotrimo neke od važnijih razloga i posljedica navedenih dvojbi. Djelovanje električne struje na čovjeka iskazuje se različito: osjetljivi podražaji, nehotično grčenje mišića, nastajanje opekotina i razaranje tkiva, gušenje, posljedice na živčanom i respiratornom sustavu s brojnim popratnim pojavama te ventrikularna fibrilacija srca kao najopasnija posljedica. Posljedice djelovanja električne struje na čovjeka, ovise o putu protjecanja struje kroz tijelo odnosno tjelesnom organu koji je zahvaćen protjecanjem struje, obliku i frekvenciji struje te jakosti i vremenu trajanja protjecanja struje. Pojedini unutarnji organi ljudskog organizma veoma su osjetljivi na protjecanje električne struje. Ta je osjetljivost u vezi s impedancijom tijela koja se znatno mijenja ovisno o okolnostima električnog udara kao što su narinuti napon, vrijeme protjecanja struje, osjetljivost izložene osobe, te još ovisi o starosti, spolu i zdravstvenom stanju. Uzimanje u obzir različitih parametara tih okolnosti i njihovo definiranje na različit način dovodi do razlike između IEC propisa i IEEE normi. Razlike su u prvom redu posljedica različitog pristupa pojmu impedancije tijela. IEC propisi, za razliku od IEEE norma, uzimaju u obzir naponsku ovisnost impedancije tijela, kao i utjecaj puta kojim struja protječe kroz tijelo. IEEE norma temelji se uglavnom na istraživanjima C. F. Dalziela koji smatra da struja fibrilacije ovisi o težini tijela, dok IEC propisi težinu tijela ne smatraju faktorom sa znatnijim utjecajem na struju fibrilacije.

Na slici 3.2–1 prikazana je vremenska ovisnost struje fibrilacije dobivena u UL-u (United Laboratories) i CPSC-u (Consumer Product Safety Commision). Tu usporedbu proveli su J. E. Bridges, M. Vainberg i M. D. Wills [L2].



Sl. 3.2–1. Vremenska ovisnost struje fibrilacije.

U tablici 3.2–1 dana je usporedba za impedanciju tijela. IEEE norme koriste se impedancijom tijela koja ne ovisi o putu kojim struja protječe kroz tijelo. U IEEE normama impedancija tijela ne ovisi o naponu.

IEC propisi razlikuju početnu i normalnu impedanciju tijela. Početna impedancija tijela u vezi je s prijelaznom pojavom kapacitivne prirode. Normalnu impedanciju tijelo poprima nakon prijelazne pojave. Tablica 3.2–2 objedinjuje navedene podatke na slici 3.2–1 i tablici 3.2–1 te prikazuje ovisnost naponskih i strujnih pragova fibrilacije o vremenu trajanja udara i o strujnom putu.

Tablica 3.2–1. Usporedba impedancije tijela Z_t za putove struje od obje ruke prema objema nogama.

	IEEE	IEC	
Napon dodira, V	Z_t, Ω	Početna Z_t, Ω	Normalna Z_t, Ω
125	1000	250	550
220	1000	250	500
700	1000	250	375
1000	1000	250	350

Tablica 3.2–2. Usporedba praga napona i struje fibrilacije prema IEEE i IEC kriterijima.

Trajanje udara, s	Strujni put	Prag napona i struje fibrilacije			
		IEEE mA	IEEE V	IEC mA	IEC V
0,008	noga – noga	1300	1300	> 5000	> 3250
	ruka – ruka	1300	1300	1250	950
	lijeva ruka – obje noge	1300	1300	500	370
	obje ruke – obje noge	1300	1300	–	260
	lijeva ruka – tijelo	1300	1300	333	175
0,06	noga – noga	474	474	> 4500	> 3250
	ruka – ruka	474	474	1125	900
	lijeva ruka – obje noge	474	474	450	350
	obje ruke – obje noge	474	474	–	250
	lijeva ruka – tijelo	474	474	300	160
1,00	noga – noga	116	116	> 500	> 440
	ruka – ruka	116	116	125	135
	lijeva ruka – obje noge	116	116	50	55
	obje ruke – obje noge	116	116	–	40
	lijeva ruka – tijelo	116	116	33	33
5,40	noga – noga	50	50	> 330	> 370
	ruka – ruka	50	50	83	115
	lijeva ruka – obje noge	50	50	33	45
	obje ruke – obje noge	50	50	–	33
	lijeva ruka – tijelo	50	50	22	26

Uočavaju se znatne razlike naponskih i strujnih pragova za slučajeve ruka – ruka i ruka – tijelo za vremena trajanja udara od 0,01 ili 1 s. Primjerice, pragovi napona fibrilacije prema IEC kriterijima iznose 1/4 do 1/7 pragova napona fibrilacije prema

IEEE kriterijima (za druga vremena razlike nisu tako velike, ali su i dalje primjetne). Sustavi uzemljenja izvedeni prema IEEE kriterijima nedovoljno su dimenzionirani u odnosu na sustave uzemljenja izvedene prema IEC kriterijima za strujne putove ruka – ruka i ruka – tijelo, posebno kada je trajanje električnog udara od 0,01 do 1 s ili kada je serijska impedancija izvan ljudskog tijela najmanja. S druge strane, sustavi uzemljenja izvedeni prema IEEE kriterijima predimenzionirani su u odnosu na sustave izvedene prema IEC kriterijima za strujni put noga – noga. To se predimenzioniranje opravdava pomanjkanjem podataka o tzv. pojavi *obaranja* za strujni put noga – noga i o mogućim posljedicama električnog udara kada je tijelo u nekoj od faza obaranja. Obaranje nastaje zbog kontrakcije nožnih mišića, do koje dolazi djelovanjem napona koraka. Padanjem na zemlju izložena osoba može na različite načine tijelom premostiti znatno veći napon od napona koraka kojim je uzrokovano obaranje.

3.2.1. Impedancija tijela

Kada električna struja protječe kroz živi organizam, oslobađa se izvjestan dio energije, što može imati dvije posljedice:

- privremenu modifikaciju fiziologije organa ili cijelog organizma u formi uzbuđenosti ili zakočenosti
- termičke učinke (toplinski impuls je definiran Jouleovim zakonom).

Prvi proces dovodi do tri klinička slučaja: akutna ili privremena pojava poznata kao *električni udar*, prestajanje disanja, i što je najgore, prestanak cirkulacije koja je obično povezana s ventrikularnom fibrilacijom koja je bitni uzrok početka usmrćivanja. Za te je pojave potrebna relativno mala struja. Definiranje tih pragova bitno je za određivanje kriterija zaštite. Međutim, u praksi je moguć samo statistički pristup i on mora uzeti u obzir fiziološka svojstva izložene osobe i različite parametre koji određuju električni udar: napon, jakost i trajanje struje, frekvenciju i oblik narinutog napona, mjesto u kojem je napon narinut, put struje i impedanciju tijela.

Drugi je proces odgovoran za nastajanje rana, njihov položaj, razmjere i posljedice, što ovisi o strujnom putu i parametrima Jouleove jednadžbe (napon, jakost i trajanje struje).

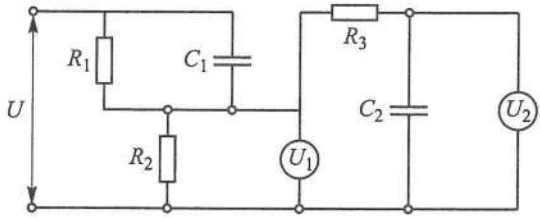
Prema djelovanju struje na organizam razlikujemo *osjetilnu struju*, *struju reagiranja* i *struju ventrikularne fibrilacije*. Osjetilna je struja najniža struja koju čovjek može osjetiti. Ona iznosi 1,1 mA za muškarce i 0,7 mA za žene. Struja je reagiranja najmanja struja koja može uzrokovati nehotičnu reakciju. Iako sama ne može dovesti do bitnijih bioloških djelovanja, ona često uzrokuje sekundarna djelovanja i dovodi do negativnih posljedica. Ako struja i dalje raste, dolazimo do praga kada izložena osoba zbog zgrčenosti (grča mišića) više nije u mogućnosti ispustiti vodič pod naponom. Najveća struja pri kojoj je još uvijek moguće ispustiti vodič naziva se *struja otpuštanja*. Ventrikularna fibrilacija srca najopasnija je posljedica djelovanja električne struje i predstavlja kontrakciju srca kojom ono prati frekvenciju struje. To naposljetku dovodi do zaustavljanja rada srca. Kada jednom dođe u stanje fibrilacije, srce se veoma teško spontano vraća u normalnu aktivnost.

Najvažnije je pitanje zaštite, prema tome, utvrditi struju koja vjerojatno neće kod normalne osobe uzrokovati fibrilaciju. U skladu s već iznesenim, utvrđivanje te vrijednosti nije moguće ostvariti izravno na ljudima, nego se o toj vrijednosti mora zaključiti induktivno na osnovi pokusa sa životinjama. To znači da dobivene vrijednosti teško mogu biti sasvim točne.

Posljedice djelovanja struje uglavom su srazmjerne jakosti struje i trajanju udara. U skladu s Ohmovim zakonom, jakost struje koja prolazi kroz tijelo ne ovisi samo o impedanciji tijela, nego o impedanciji cijelog kruga. Obično je impedancija vanjskog kruga neznatna u usporedbi s impedancijom tijela.

Pri nižim frekvencijama impedancija je pretežno djelatna, a pri višim frekvencijama postaje nelinearna i kapacitivna. Primaran utjecaj na impedanciju tijela ima otpor kože. Taj je otpor pri nižim naponima i nižim frekvencijama glavni ograničavajući faktor protjecanja struje. Međutim, u slučaju visokog napona i visoke frekvencije, utjecaj tog otpora naglo se smanjuje. Kod napona od 240 V i viših napona, dolazi do proboja kože s dubokim opekotinama. Na tome se mjestu impedancija tijela znatno smanjuje te unutarnja impedancija tijela postaje najznačajniji faktor ograničavanja struje. Iznad 1 000 Hz impedancija tijela, zbog stanične strukture tkiva, postaje nelinearna. Pokazano je da smanjenje impedancije može biti 50 % pri promjeni frekvencije od 50 na 50 000 Hz. Otpor kože, međutim, varira i s obzirom na mjesto na tijelu i na njezinu vlažnost. Suha koža može imati otpor od 100 do 300 kΩ/cm^2, ali kada je koža mokra, taj otpor može pasti na samo 1 % te vrijednosti.

Na osnovi istraživanja G. Biegelmeira [L3] zaključeno je da se impedancija čovječjeg tijela sastoji od dviju impedancija kože, ulazne R_1 i C_1 i izlazne R_2 i C_2 i od unutarnjeg otpora R_3. Impedancija tijela dobije se vektorskim zbrajanjem impedancija kože i unutarnjeg otpora tijela. Unutarnja impedancija može se smatrati pretežno djelatnom, iako može imati i kapacitivnu komponentu (nije predstavljena na nadomjesnoj shemi, sl. 3.2–2).

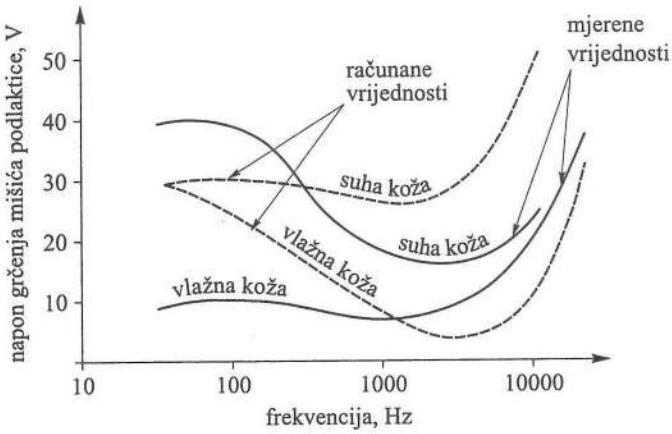


R_1 – ulazni djelatni otpor kože čovjekova tijela
C_1 – ulazni kapacitet kože čovjekova tijela
R_2 – izlazni djelatni otpor kože čovjekova tijela
C_2 – izlazni kapacitet kože čovjekova tijela
R_3 – unutarnji djelatni otpor čovjekova tijela
U – napon pod kojim je čovjek u primjeru električnog udara
U_1 – napon na izlazu struje iz kože u tijelo čovjeka
U_2 – napon na izlazu struje iz čovjekova tijela

Sl. 3.2–2. Nadomjesna električna shema tijela.

W. F. Hart [L4] je definirao nadomjesnu električnu mrežu tijela, slika 3.2–2. Otpori R_1, R_2 i kapacitet C_1 dobiveni su iz niza mjerenja za različite uvjete udara, vlažnosti kože i strujne putove. Otpor R_3 i kapacitet C_2 stalne su vrijednosti i reduciraju V_2 razmjerno opadanju mišićne reakcije s rastom frekvencije. Vrijednosti otpora R_3 i kapaciteta C_2 ovise o uvjetima udara. Prednost je te sheme u odnosu na uobičajene *RC* sheme u činjenici da je razina struje kroz R_2 ona koja se može očekivati kada čovjek drži kontakte, čak i pri frekvenciji do 100 kHz (uobičajene sheme daju pouzdane rezultate samo za standardne frekvencije). U slučaju sheme s paralelnim *RC* krugovima impedancija pri visokim frekvencijama niža je od stvarne unutarnje impedancije tijela. Nasuprot tomu, ako bi se koristila metoda mjerenja pomoću otpora, impedancija mreže bila bi (zbog *skin-efekta*) pri visokim frekvencijama veća od stvarne.

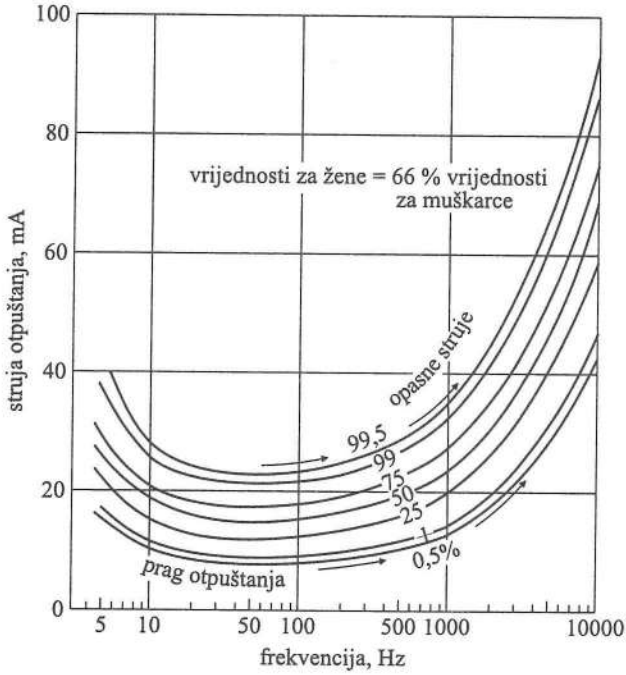
Zanimljivi su rezultati do kojih je došao W. F. Hart [L4] u pogledu odnosa pragova napona i frekvencija. Slika 3.2–3 prikazuje rezultate za suhu i vlažnu kožu za frekvencijsko područje od 10 do 10000 Hz. Pune crte predstavljaju mjerene vrijednosti napona pri kojima je došlo do grčenja mišića podlaktice, a crtkane crte predstavljaju rezultate dobivene s pomoću nadomjesne sheme. Podaci jasno pokazuju da je najmanji napon potreban da uzrokuje grčenje u području od 500 Hz do 3 kHz. Bez obzira na odstupanja među krivuljama, zanimljiva je činjenica da se naponska krivulja ovisnosti o frekvenciji na slici 3.2–3 razlikuje od strujne na slici 3.2–1.



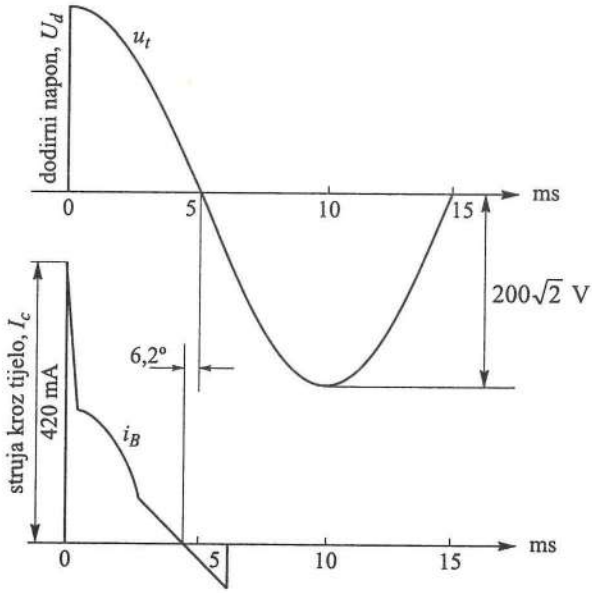
Sl. 3.2–3. Reakcija tijela na priključeni napon.

Mjerenja izvršena na četiri muškarca i jednoj ženi dala su različite rezultate. Te rezultate W. F. Hart objašnjava činjenicom da impedancija kože počinje opadati prije pojave tzv. *reducirane mišićne reakcije* zbog koje se podižu strujni pragovi.

Na slici 3.2–4 dana je, radi usporedbe, ovisnost struje otpuštanja o frekvenciji. Na toj se slici jasno vidi da je kritično područje upravo oko mrežnih frekvencija (50 do 60 Hz).



Sl. 3.2–4. Ovisnost sinusne struje otpuštanja o frekvenciji.



Sl. 3.2–5. Struja kroz tijelo preko obje ruke i dodirni napon pri izmjeničnom naponu od 200 V, suhi uvjeti, uspostavljanje kontakata pri vršnoj vrijednosti napona, prekidanje kontakata prekidačem.

Prije spomenuta nelinearnost impedancije tijela jasno je vidljiva na slici 3.2–5. Poslije vršne vrijednosti struje, niža je vrijednost približno razmjerna amplitudi napona dodira narinutoga naponskog vala. Strujni impuls (šiljak) posljedica je kapacitivnih svojstava impedancije kože (zato se definira početna i normalna impedancija). Prema podacima do kojih je došao J. E. Bridges [L6] vršna vrijednost strujnog impulsa pri 20 V veća je oko 4 puta od srednje vrijednosti struje koja slijedi poslije toga. Za napon od 100 V, vršna vrijednost strujnog impulsa veća je 1,5 puta od srednje vrijednosti struje koja slijedi.

3.2.2. Faktori koji utječu na impedanciju tijela

U tablici 3.2–3 dani su podaci za impedanciju tijela koje je utvrdila radna skupina 4. Međunarodnog elektrotehničkog povjerenstva (IEC) za strujne putove ruka – ruka i ruka –noga pri površini dodira od 80 do 100 cm^2.

Tablica 3.2–3. Impedancija tijela za različite dodirne napone za strujne putove ruka – ruka i ruka – noga.

Dodirni napon, V	Impedancija tijela, Ω		
	s 5 % vjerojatnosti	s 50 % vjerojatnosti	s 95 % vjerojatnosti
25	1750	3250	6100
50	1450	2800	5100
75	1250	2550	4500
100	1200	2400	4150
125	1100	2200	3800
220	1000	1800	3000
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
asimptotska vrijednost	650	750	850

Početna impedancija tijela 500 Ω.

Za strujne putove koji nisu ruka – ruka ili ruka – noga vrijednosti se množe sa sljedećim korekcijskim faktorima:

– ruka na oba stopala	0,75
– obje ruke na oba stopala	0,50
– od ruke na trup	0,50
– obje ruke na trup	0,25

Kako se vidi iz tablice, vrijednosti impedancije tijela pridružuje se vjerojatnost. Različiti strujni putovi uzimaju se u obzir uvođenjem korekcijskog faktora. Sljedeći je korekcijski faktor kojim se korigira impedancija tijela tzv. faktor struje srca.

S obzirom na posebnu osjetljivost srca na električno djelovanje u utvrđivanju kriterija zaštite posebno je važna struja čije protjecanje zahvaća područje srca. Podaci koji su dani u tablici 3.2–4 temelje se na gustoći struje koja protječe od lijeve ruke

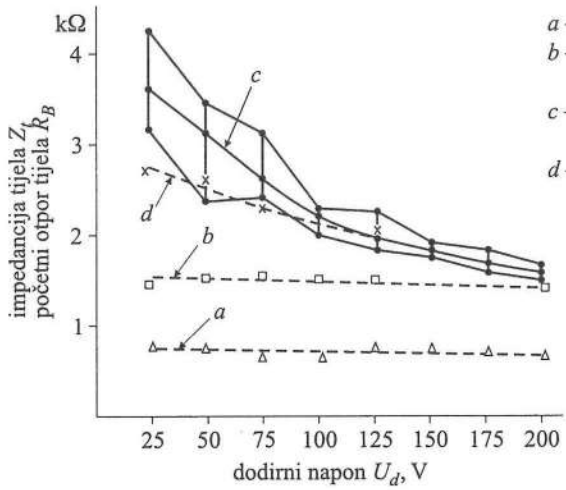
prema lijevoj nozi. Vidimo da 50 % više struje protječe kroz područje srca u slučaju strujnog puta od grudi prema lijevoj ruci. Za strujni put od lijeve ruke prema desnoj ruci samo 40 % struje protječe kroz područje srca. Takav faktor struje srca uključen je u kriterije zaštite od električnog udara Međunarodnoga elektrotehničkog povjerenstva [L2]. H. Freiberger [L7] daje omjere struje koja protječe kroz srce prema ukupnoj struji za različite strujne putove.

Tablica 3.2–4. Faktor srca za različite strujne putove.

Strujni put	Faktor struje srca
lijeva ruka – lijeva noga, desna ruka – obje noge, obje ruke – obje noge	1,0
lijeva ruka – desna ruka	0,4
desna ruka – lijeva noga ili obje noge	0,8
leđa – desna ruka	0,3
leđa – lijeva ruka	0,7
grudi – desna ruka	1,3
grudi – lijeva ruka	1,5
stražnjica – lijeva ruka, desna ruka ili obje ruke	0,7

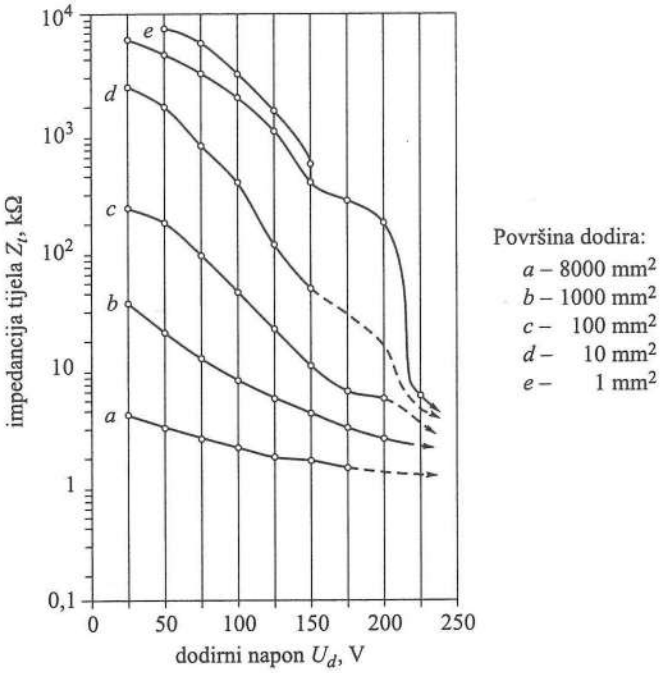
Tablica 3.2–3 jasno pokazuje ovisnost impedancije tijela o narinutom naponu. To su potvrdila i istraživanja koja je proveo G. Biegelmeier [L8].

Kako se vidi s dijagrama na slici 3.2–6, početni otpor tijela nije izrazita funkcija napona, kao ni impedancija u uvjetima vlažnog kontakta (npr. pri intenzivnom znojenju). Obična voda ne smanjuje znatno impedanciju tijela, pa je ona razmjerno visoka pri nižim naponima, kao i u slučaju suhih ruku. Taj je dijagram dobiven za strujni put ruka – ruka, impedancije su manje za ostale strujne putove.

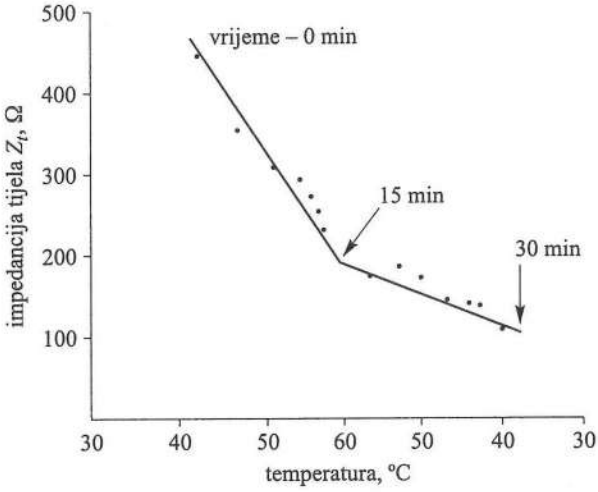


a – početni otpor tijela R_B
b – impedancija tijela pri vlažnim uvjetima kože s 3 % NaCl
c – prosječna impedancija tijela pri suhim uvjetima
d – impedancija tijela pri vlažnim uvjetima kože s običnom vodom

Sl. 3.2–6. Naponska ovisnost impedancije tijela za strujni put ruka – ruka.



Sl. 3.2–7. Ovisnost impedancije tijela o površini dodira i dodirnom naponu za različite površine dodira.



Sl. 3.2–8. Ovisnost impedancije tijela o temperaturi pri postupnom porastu, a zatim smanjenju temperature tijela.

Impedancija tijela ovisi i o površini dodira. Na slici 3.2–7 vidi se kako razlika između krivulja *a* i *e* opada s približavanjem vrijednosti napona od 200 V. Ta je poja-

va uzrokovana smanjenjem impedancije kože, što se zbiva pri višim naponima (vrijednosti izmjerene za površinu dodira od 1 mm^2 nisu pouzdane za napone ispod 150 V, a za napone iznad 200 V dolazi do bitnih oštećenja kože).

Također, na osnovi pokusa sa životinjama koje su proveli drugi autori [L10], dobiveni su podaci o utjecaju temperature na impedanciju tijela. Na slici 3.2–8 vidi se da impedancija tijela opada i poslije prestanka porasta temperature. Pri temperaturi od 60 °C (maksimalna temperatura u tim pokusima), vrijednost impedancije tijela samo je 50 % početne vrijednosti. Uočena pojava opadanja impedancije tijela i nakon prestanka porasta temperature, pa čak i pri njezinu smanjenju, može se objasniti razaranjem tkiva.

3.2.3. Dodirni napon i napon koraka

Pitanje uzajamnosti biološkog djelovanja električnog udara i kriterija zaštite od dodirnog napona i napona koraka bitno je i za pitanje pouzdanijeg inženjerskog rješavanja zadaća u vezi s uzemljivanjem. Jer, kao što znamo, uzemljivanje je najvažnija mjera zaštite od opasnog napona koraka i dodira. U rješavanju zadaće učinkovitog uzemljivanja suočeni smo s dvama proturječnim zahtjevima: zahtjevom za najvećom sigurnošću i najmanjim troškovima. Nepoznavanje svih parametara sustava najčešće se prevladava njihovim pretpostavljanjem tako da se ne naruše sigurnosni zahtjevi, što se s druge strane uglavnom ostvaruje na štetu drugog zahtjeva.

Razmotrimo kriterije određene *Pravilnikom o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja iznad 1 kV* [16]. Tim pravilnikom definiraju se dodirni napon i napon koraka ovisno o trajanju električnog udara. Pravilnik dopušta veće vrijednosti tih napona u ograđenom postrojenju nego izvan njega. Za postrojenja do 1 kV dopušteni je dodirni napon za duže trajanje električnog udara 50 V [14].

Razmotrimo, nadalje, neke aspekte naših propisa u usporedbi s američkim. Struja fibrilacije, prema tablici 3.2–2, za trajanje električnog udara od 1 s, prema američkim normama IEEE, iznosi 116 mA. Množenjem te struje fibrilacije s 1000 Ω, dobije se napon fibrilacije za trajanje udara od 1 s. On iznosi 116 V. Ta je vrijednost znatno veća od 65 V na ogradi i izvan nje, kako je određeno propisima [22]. Međutim, gledano na taj način, dopušteni napon koraka od 125 V previsok je.

Razmatranjem IEC kriterija, dolazi se do nešto drukčijih odnosa. Za strujni put noga – noga, koji odgovara naponu koraka, za trajanje udara od 1 s dolazi se do vrijednosti napona koraka od preko 440 V. Vjerojatnost pojave takvog napona koraka veoma je mala. (Npr. prema [48] mjerenja napona koraka u TS 400/110 kV u Ernestinovu pokazala su najviše vrijednosti napona koraka 92 V, a dodirnog napona 107 V). Međutim, za strujni put od lijeve ruke prema objema nogama napon fibrilacije iznosi 55 V, a navedeni pravilnik [16] predviđa 65 V. U najgorem slučaju za strujni put lijeva ruka – tijelo napon fibrilacije iznosi samo 33 V, što je gotovo dvostruko manje od dopuštenog napona utvrđenog našim propisima.

Navedene vrijednosti napona fibrilacije dobivene su prema sljedećem izrazu:

$$U_f = A_A \cdot B \cdot C_C \cdot D_D \qquad (3.2\text{–}1)$$

gdje je:

U_f prag napona fibrilacije

A_A prag struje fibrilacije (slika 3.2–1), krivulja c

B faktor srca za odabrani strujni put (tablica 3.2–4),

C_C impedancija tijela s vjerojatnošću 5 % (tablica 3.2–3) i

D_D korekcija impedancije za odabrani strujni put (tablica 3.2–3) s korekcijskim faktorima.

Nadalje, u Pravilniku [16] i normi [66] ne spominje se frekvencija, iako do električnog udara može doći kod frekvencije različite od 50 Hz, s obzirom na to da različite poremećaje u sustavu i sklopne zahvate prate struje veoma širokoga frekvencijskoga spekta.

Detaljnije u [48], iz koje je preuzet veći dio ovog poglavlja.

[L1] Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria, Toronto, 1983.

[L2] Bridges, J. E. E., Vainberg M., Wills M. D.: *Impact of recent developements in biological electrical shock safety criteria*, IEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, str. 238–248, br. 1, Januar 1987.

[L3] Bigelmeiers: *New knowledge on the impedance of the human body*, Proceedings of the First International Symposium on Electrical Shock Safety Criteria, str. 115–132, Toronto, 1983.

[L4] Hart, W. F.: *A five-part resistor – capacitor network for measurement of voltage and current levels related to electric shock and burns*, Proceedings, str. 183–192.

[L6] Bridges, J. E.: *Body impedance of non-human primates under constant voltage shock conditions*, Proceedings, str. 133–150.

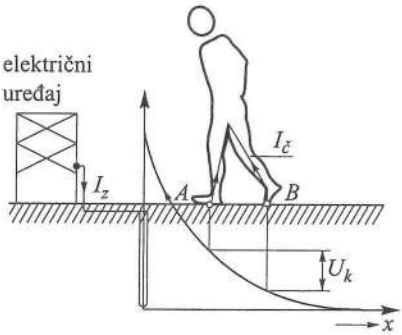
[L7] Freiberger, H.: *Der elektrische Winderstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich – und Wechselstrom*, Verlag Julius Springer, Berlin, 1934.

[L8] Biegelmeier, G.: *New experiments with regard to basic safety measures for electrical equipment and installations*, Proceedings, str. 161–172.

[L10] Chilbert, M., Swiontek, T., Prieto, T., Sances, A. Jr., Myklebust, J., Ackmann, J., Brown, C., Szablya, J.: *Resistivity changes of tissue during the application of injurious 60 Hz currents*, Proceedings, str. 193–202.

3.3. SKRAĆENI IZRAČUN STRUJE KOJA PROLAZI KROZ LJUDSKO TIJELO TIJEKOM ELEKTRIČNOG UDARA PRI NAPONU DODIRA I KORAKA

Promatramo čovjeka na tlu u kojem je ukopan uzemljivač, slika 3.3–1. Pri protjecanju struje kroz uzemljivač nastaje razdioba potencijala oko uzemljivača i razlika potencijala između stopala A i B (napon koraka), te će u tom momentu teći određena struja kroz ljudsko tijelo ($I_č$).



Sl. 3.3–1. Strujni krug kroz noge ljudskog tijela pri naponu koraka U_k.

Za izračun struje $I_č$ kroz ljudsko tijelo prema [11] i [4], mora se poznavati napon između točaka A i B, tj. kontakata ljudskog tijela s površinom tla (napon koraka U_k) i nadomjesne otpore strujnog kruga. Nadomjesni otpori strujnog kruga sastoje se od otpora rasprostiranja R_{rs} i otpora tijela $R_č$, zanemarujući neke prijelazne otpore (što je iz sigurnosnih razloga pozitivno) kako je to prikazano na slici 3.3–1.

Za praktične izračune koriste se približni izračuni otpora rasprostiranja ljudskog stopala, modelirajući ljudsko stopalo okruglom pločom koja dodiruje površinu zemlje, te otpor rasprostiranja iznosi:

$$R_{rs} = \frac{\rho_z}{4b} \tag{3.3–1}$$

gdje je:

- b polumjer pločastog uzemljivača kojim nadomještamo ljudsko stopalo površine A_s (m^2)
- ρ_z specifični otpor tla na površini tla na kojem se pojavljuje opasni dodirni napon i napon koraka.

Iz sigurnosnih razloga uzima se nepovoljniji slučaj, tj. veliko ljudsko stopalo odraslog čovjeka površine oko $A_s \approx 200$ cm^2 za koje je polumjer $b \approx 8$ cm te otpor rasprostiranja jednog stopala iznosi:

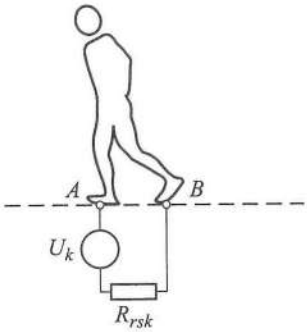
$$R_{rs} = \frac{\rho_z}{4b} = \frac{\rho_z}{4 \cdot 0{,}08} = 3{,}125\rho_z \approx 3\rho_z, \quad \Omega \tag{3.3–2}$$

Pri koraku, slika 3.3–2, otpori su ljudskog tijela u serijskom spoju, te nadomjesni otpor R_{rsk} iznosi:

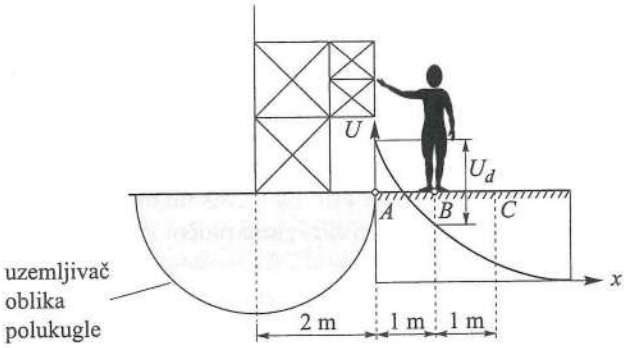
$$R_{rsk} = 2R_{rs} = 2 \cdot 3\rho_z = 6\rho_z, \quad \Omega \tag{3.3–3}$$

Pri dodiru, slika 3.3–3 i slika 3.3–4, otpori su ljudskog stopala u paralelnom spoju stopala, te nadomjesni otpor iznosi:

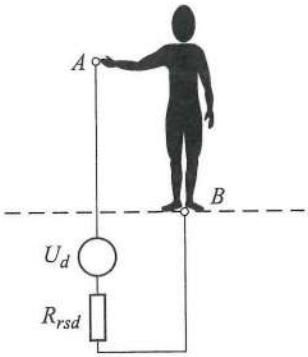
$$R_{rsd} = \frac{R_{rs}}{2} \approx \frac{3\rho_z}{2} = 1{,}5\rho_z, \quad \Omega \tag{3.3–4}$$



Sl. 3.3–2. Otpor ljudskih stopala R_{rsk} pri naponu koraka U_k.



Sl. 3.3–3. Ljudsko tijelo pri dodirnom naponu U_d.



Sl. 3.3–4. Otpor ljudskog stopala R_{rsd} pri dodirnom naponu U_d.

Vidimo da je nadomjesni otpor ljudskih stopala u slučaju dodira nepovoljniji, tj. četiri je puta manji od nadomjesnog otpora u slučaju koraka. Za točnije izračune treba uzeti u obzir otpor sustava uzemljenja. No, kako je otpor sustava uzemljenja veoma mali u odnosu na otpor stopala, ovaj je približni proračun za praksu dovoljno točan.

Struja kroz ljudsko tijelo u slučaju koraka iznosi:

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_{rsk} + R_č} \tag{3.3–5}$$

Struja kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira iznosi:

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_{rsd} + R_č} \tag{3.3–6}$$

$R_č$ je otpor ljudskog tijela između dodirnih točaka A i B. Taj otpor, prema [4], između stopala iznosi oko 2000 Ω, a između stopala i ruke oko 1000 Ω. Nekada se (iz sigurnosnih razloga) uzimaju za 50 % manje vrijednosti, tj. u slučaju koraka 1000 Ω, a u slučaju dodira 500 Ω.

Primjer 3A

Kolika je struja kroz čovjeka u slučaju dodira i koraka u postrojenju prema slici 3.3–3 koje je uzemljeno uzemljivačem oblika polukugle polumjera r_1 = 2 m. Struja zemljospoja I_z = 100 A, a otpornost tla ρ_z = 80 Ωm.

Otpor uzemljenja uzemljivača oblika polukugle (koji smo proizvoljno odabrali zbog jednostavnosti izračuna) iznosi:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi r_1} = \frac{80}{2\pi \cdot 2} = 6{,}366\Omega$$

Pri zemljospoju, potencijal na uzemljivaču iznosi:

$$V_z = I_z R_z = 100 \cdot 6{,}366 = 636{,}6\text{V}$$

Dodirni je napon razlika potencijala na rastojanju 1 m od dodira električnog uređaja i iznosi:

$$U_d = V_z - U_{z+1}$$

$$U_{z+1} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi(r_1 + 1)} = \frac{100 \cdot 80}{2\pi(2+1)} = 424{,}4\text{V}$$

$$U_d = 636{,}6 - 424{,}4 = 212{,}2\text{V}$$

U_{z+1} je potencijal na razmaku 1 m od dodira, tj. u točki na kojoj je čovjek pri dodiru.

Struja kroz ljudsko tijelo $I_{čd}$ u slučaju dodira po formuli (3.3–6) iznosi:

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_{rsd} + R_č} = \frac{U_d}{1{,}5\rho_z + R_č} = \frac{212{,}2}{120 + 1000} = 0{,}190 \text{ A}$$

Struja kroz ljudsko tijelo $I_{čk}$ u slučaju koraka na istom mjestu, tj. na udaljenosti od 1 m od postrojenja (uzemljivača) računa se iz (3.3–5).

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_{rsk} + R_č} = \frac{U_k}{6\rho_z + R_č} = \frac{212{,}2}{6 \cdot 80 + 1000} = 0{,}143 \text{ A}$$

Namjerno smo uzeli da je dodirni napon jednak naponu koraka da se vidi razlika struje i opasnost po čovjeka od dodirnog napona i napona koraka.

Ako bismo prema [4] za otpor ljudskog tijela uzeli da je 2000 Ω, onda je:

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_{rsk} + R_č} = \frac{212{,}2}{6 \cdot 80 + 2000} = 0{,}086 \text{ A}$$

Kako vidimo struja kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira (pri dodirnom naponu) i koraka (pri naponu koraka) veća je od granične trajne smrtno opasne struje od 0,05 A. Ako bismo površinu iznad uzemljivača i oko uzemljivača nasuli slojem šljunka debljine nekoliko centimetara, otpornosti $\rho_š = 2000$ Ωm, struja kroz čovjeka u slučaju napona dodira i koraka iznosila bi:

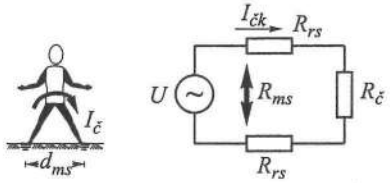
$$I_{čd} = \frac{U_d}{1{,}5\rho_š + R_č} = \frac{212{,}2}{1{,}5 \cdot 2000 + 1000} = 0{,}053\text{A}$$

$$I_{čk} = \frac{U_k}{6\rho_š + R_č} = \frac{212{,}2}{6 \cdot 2000 + 1000} = 0{,}016 \text{ A}$$

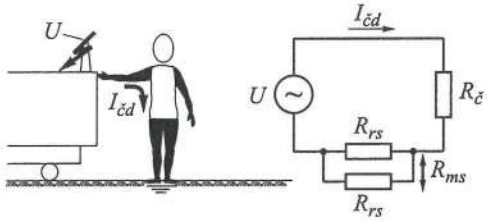
Vidimo da smo dodatnom mjerom (nasipanjem šljunka) po površini kretanja čovjeka, gdje se pojavljuje opasan dodirni napon i napon koraka, smanjili struju $I_{čd}$ na 0,053 A odnosno na 28 % (dakle blizu granične struje od 0,5 A) i u slučaju koraka na mnogo manju vrijednost od 0,016 A, tj. na 19 % u odnosu na struju kroz tijelo čovjeka pri dodirnom naponu i naponu koraka ($I_{čd}$, $I_{čk}$) u primjeru kada nije nasipan šljunak. Tu treba obratiti pozornost na to da nasipavanjem šljunka nije promijenjen otpor uzemljenja jer se nasipavanjem šljunka neznatno mijenja otpornost tla ρ_z u koje je ukopan uzemljivač. Naime, radi se o dubinskom uzemljivaču, tj. uzemljivaču položenom na određenu dubinu ispod površine zemlje. To ne vrijedi za površinski uzemljivač. Također tu nije određena debljina sloja šljunka, koju ćemo kasnije odrediti (u ovom slučaju preporučuje se debljina sloja ne tanja od 10 cm).

3.4. TOČNIJI IZRAČUN STRUJE KOJA PROLAZI KROZ LJUDSKO TIJELO TIJEKOM ELEKTRIČNOG UDARA PRI NAPONU DODIRA I KORAKA

U istraživanjima [4] ljudsko stopalo modelirano je konduktivnim metalnim diskom s otporom rasprostiranja stopala R_{rs}, otporom između stopala R_{ms} na udaljenosti d_{ms}. Otpor se između čarapa i cipela zanemaruje, što doprinosi sigurnosti. Ljudska su stopala na površini tla s otpornošću ρ_z, te kroz ljudsko tijelo pri dodiru odnosno koraku teče struja $I_{čd}$ odnosno $I_{čk}$ kako je to prikazano na slikama 3.4–1 i 3.4–2.



Sl. 3.4–1. Nadomjesna shema za put struje kroz ljudsko tijelo u slučaju koraka.



Sl. 3.4–2. Nadomjesna shema za put struje kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira.

Ukupni je otpor strujnog kruga R_{uk} u slučaju koraka:

$$R_{uk} = R_č + 2(R_{rs} - R_{ms}), \tag{3.4–1}$$

a u slučaju dodira:

$$R_{ud} = R_č + 0{,}5(R_{rs} - R_{ms}) \tag{3.4–2}$$

Uzajamni otpor između stopala ljudskog tijela računa se po formuli:

$$R_{ms} = \frac{\rho_z}{2\pi d_{ms}} \tag{3.4–3}$$

gdje je:

d_{ms} razmak stopala, m.

Struja kroz tijelo čovjeka u slučaju koraka iznosi:

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_{uk}} \tag{3.4–4}$$

Struja kroz tijelo čovjeka u slučaju dodira iznosi:

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_{ud}} \tag{3.4–5}$$

Iz formula (3.4–1) i (3.4–2) vidi se negativni doprinos uzajamnog otpora između stopala ljudskog tijela R_{ms} ukupnom otporu pri koraku, a posebno pri dodiru.

Primjer 3B

Za otpornost tla $\rho_z = 80\ \Omega$m, uzajamni otpor između stopala u slučaju koraka pri udaljenosti stopala od 1 m iznosi:

$$R_{ms} = \frac{80}{2\pi \cdot 1} = 12{,}7\Omega$$

dok u slučaju dodira, pri udaljenosti stopala od 0,1 m iznosi:

$$R_{ms} = \frac{80}{2\pi \cdot 0{,}1} = 127{,}3\Omega$$

Primjer 3C

Treba izračunati struju koja prolazi kroz čovjeka iz primjera 3A u slučaju dodira i koraka primjenom točnijih formula (3.4–1) i (3.4–2).

Podaci:

- napon na uzemljivaču $U_z = 636{,}6$ V
- dodirni napon i napon koraka $U_d = U_k = 212{,}2$ V
- otpor rasprostiranja stopala $R_{rs} = 3 \cdot \rho_z = 3 \cdot 80 = 240\ \Omega$m
- uzajamni otpor između stopala za slučaj koraka $R_{ms} = 12{,}7\ \Omega$
- uzajamni otpor između stopala za slučaj dodira $R_{ms} = 127{,}3\ \Omega$.

Struja koja prolazi kroz tijelo čovjeka u slučaju koraka iznosi:

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_č + 2(R_{rs} - R_{ms})} = \frac{212{,}2}{1000 + 2(240 - 12{,}7)} = 0{,}146\ \text{A}$$

Struja koja prolazi kroz tijelo čovjeka u slučaju dodirnog napona iznosi:

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_č + 0{,}5(R_{rs} - R_{ms})} = \frac{212{,}2}{1000 + 0{,}5(240 - 127{,}3)} = 0{,}201\ \text{A}$$

Struja koja prolazi kroz tijelo čovjeka u slučaju koraka pri točnijem izračunu po formuli (3.4–1) iznosi 0,146 A i neznatno je veća od približnog izračuna po formuli (3.3–5), prema kojoj iznosi 0,143 A. Razlog je neznatne razlike u malom utjecaju otpora između stopala R_{ms} na ukupni otpor strujnog kruga. Struja koja prolazi kroz tijelo čovjeka u slučaju dodira pri točnijem izračunu po formuli (3.4–2) iznosi 0,201 A i veća je od približnog izračuna po formuli (3.3–6), prema kojoj iznosi 0,190 A.

Utjecaj otpora između ljudskih stopala R_{ms} na struju koja prolazi kroz tijelo čovjeka u oba slučaja nepovoljan je, jer smanjuje ukupni otpor strujnog kruga i nepovoljniji je za slučaj dodira nego za slučaj koraka.

Uputno je izračun struje kroz tijelo u slučaju koraka i dodira izračunati po točnijim formulama (3.4–4) i (3.4–5) ako smo blizu granične vrijednosti struje od 0,05 A. Ako se

odlučimo primijeniti manje točne formule (3.3–5) i (3.3–6), potrebno je zbog sigurnosti rezultate povećati za oko 10 %.

3.5. SMANJENJE OPASNOSTI OD DODIRNOG NAPONA I NAPONA KORAKA NASIPANJEM POVRŠINE TLA ŠLJUNČANIM SLOJEM

3.5.1. Utjecaj debljine sloja šljunka

U primjeru 3A dan je skraćeni izračun povoljnog djelovanja šljunčanog sloja na smanjenje struje kroz čovjeka, tj. na smanjenje opasnosti od napona dodira i koraka. U ovom detaljnijem izračunu razmatra se utjecaj debljine sloja šljunka na smanjenje dodirnog napona i napona koraka. Ta mjera ima veliku primjenu u elektroenergetskim postrojenjima.

Tanki sloj šljunka (debljine od 5 do 15 cm) nasipa se na površinu tla iznad uzemljivača i površine gdje je razdioba potencijala oko uzemljivača takva da imamo opasni dodirni napon i napon koraka. Ako tlo ispod šljunka ima manju otpornost od šljunka samo manji dio struje kvara teče kroz šljunak i razdioba napona po površini tla gotovo je takva kao kad nema šljunka (što je u praksi redoviti slučaj). Struja je kroz ljudsko tijelo umanjena, jer se povećao otpor rasprostiranja između zemlje i stopala. Učinak šljunčanog sloja povoljniji je nego u slučaju da je uzemljivač položen u debeli sloj šljunka, jer se time znatno poveća otpor uzemljenja i razmjerno potencijal uzemljenja za istu struju zemljospoja, te ta mjera za smanjenje opasnosti od napona dodira i koraka, nije efikasna i preporučljiva.

Formula za izračun otpora stopala R_{rs} (3.3–1) dopunjuje se funkcijom $F(X_1)$, a formula za izračun uzajamnog otpora između stopala R_{ms} (3.4–3) dopunjuje se funkcijom $F(X_2)$:

$$R_{rs} = \frac{\rho_š}{4b} F(X_1) \tag{3.5–1}$$

$$R_{ms} = \frac{\rho_š}{2\pi d_{ms}} F(X_2) \tag{3.5–2}$$

$$F(X) = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} Q_z \tag{3.5–3}$$

$$Q_z = \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nX)^2}} \tag{3.5–4}$$

$$k = \frac{\rho_z - \rho_š}{\rho_z + \rho_š} \tag{3.5–5}$$

$$X = X_1 = \frac{h_š}{b} \tag{3.5–6}$$

$$X = X_2 = \frac{h_š}{d_{ms}} \tag{3.5–7}$$

gdje je:

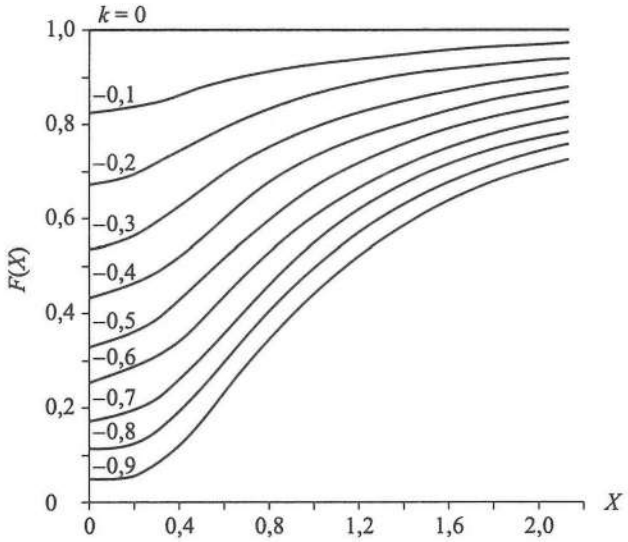
$h_š$ debljina šljunčanog sloja, m

b polumjer nadomjesnog pločastog uzemljivača kojim se nadomješta stopalo ($\approx$ 0,08 m)

d_{ms} razmak stopala, m

k faktor otpornosti tla, ovisi o otpornosti tla ρ_z i o otpornosti sloja šljunka $\rho_š$.

Te jednadžbe mogu se izvesti primjenjujući metodu slika na Sundeove jednadžbe [32], [L3, L4]. Budući da je funkcija $F(X)$ prilično složena za računanje bez računala, vrijednosti funkcije daju se dijagramom, slika 3.5–1.



Sl. 3.5–1. Funkcija $F(X)$ u ovisnosti o X za određene faktore k.

Primjer 3D

Za sloj šljunka debljine $h_š$ = 0,1 m otpornosti $\rho_š$ = 2000 Ωm te za ukopani uzemljivač u tlo otpornosti ρ_z = 80 Ωm, koji pri zemljospoju stvara potencijal uzemljivača U_z = 636,6 V, i napon dodira i koraka $U_k = U_d$ = 212,2 V (podaci iz primjera 3A) treba izračunati:

– otpor stopala za razmak stopala d_{sm} = 1 m i za polumjer nadomjesnoga pločastog uzemljivača kojim se nadomješta stopalo b = 0,08 m

– struju kroz čovjeka pri dodirnom naponu i naponu koraka.

Računamo:

$$k = \frac{\rho_z - \rho_š}{\rho_z + \rho_š} = \frac{80 - 2000}{80 + 2000} = -0{,}923$$

$$X_1 = \frac{h_š}{b} = \frac{0{,}1}{0{,}08} = 1{,}25$$

$$X_2 = \frac{h_š}{d_{ms}} = \frac{0{,}1}{1} = 0{,}1$$

Za $k = -0{,}923$ i $X = X_1 = 1{,}25$ sa slike 3.5–1 očita se $F(X_1) = 0{,}53$. Za isti k i $X = X_2 = 0{,}10$ sa slike 3.5–1 očita se $F(X_2) = 0{,}05$. Iz jednadžbe (3.5–2) uzajamni je otpor između stopala:

$$R_{ms} = \frac{\rho_š}{2\pi d_{ms}} F(X_2) = \frac{2000}{2\pi \cdot 1} \cdot 0{,}05 = 15{,}92\,\Omega$$

a iz jednadžbe (3.5–1) otpor je stopala:

$$R_{rs} = \frac{\rho_š}{4b} F(X_1) = \frac{2000}{4 \cdot 0{,}08} \cdot 0{,}53 = 3312\ \Omega$$

te je struja kroz ljudsko tijelo za napon koraka $U_k = 212{,}2$ V (3.4–1):

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_č + 2(R_{rs} - R_{ms})} = \frac{212{,}2}{1000 + 2(3312 - 15{,}92)} = 0{,}028\ \text{A}$$

Struja kroz ljudsko tijelo u slučaju dodirnog napona računa se sljedećim redom. Iz jednadžbe (3.5–2) uzajamni je otpor između stopala:

$$R_{ms} = \frac{\rho_š}{2\pi d_{ms}} F(X_2) = \frac{2000}{2\pi \cdot 0{,}1} \cdot 0{,}05 = 159{,}16\,\Omega$$

te je struja za napon dodira $U_d = 212{,}2$ V (3.4–2):

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_č + 0{,}5(R_{rs} - R_{ms})} = \frac{212{,}2}{1000 + 0{,}5(3312 - 159{,}15)} = 0{,}082\ \text{A}$$

Iz izračuna se vidi da sloj šljunka znatno smanjuje struju koja prolazi kroz ljudsko tijelo pri naponu koraka, od 0,146 A (primjer 3C) na 0,028 A, isto tako i u slučaju dodira, od 0,201 A (primjer 3C) na 0,082 A.

3.5.2. Izračun otpora ljudskog stopala zanemarujući uzajamni otpor između stopala R_{ms}

Gornje izraze moguće je pojednostavniti i za praktičnu uporabu zanemariti uzajamni otpor između stopala R_{ms}. Tako je moguće otpore rasprostiranja stopala za

serijski spoj (pri izračunu napona koraka) i za paralelni spoj (pri izračunu dodirnog napona) izraziti formulama koje su analogne formulama (3.3–3) i (3.3–4). Otpor ljudskih stopala za izračun struje kroz čovjeka u slučaju koraka iznosi:

$$R_{rsk} = 6\rho_z c_s \left(h_š \cdot k\right) \tag{3.5–8}$$

Otpor ljudskih stopala za izračun struje kroz čovjeka u slučaju dodira iznosi:

$$R_{rsd} = 1{,}5\rho_z c_s \left(h_š \cdot k\right) \tag{3.5–9}$$

gdje je:

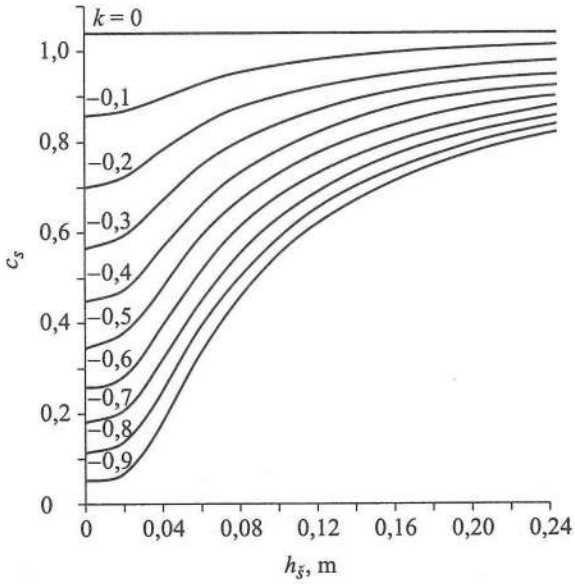
c_s redukcijski faktor za korekciju otpora površinskog sloja

$h_š$ debljina šljunčanog sloja, m.

Redukcijski faktor $c_s = 1$, ako je otpornost tla jednaka otpornosti nasutog šljunka, a za druge vrijednosti iznosi:

$$c_s = \frac{1}{0{,}96}\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_š}{0{,}08}\right)^2}}\right] \tag{3.5–10}$$

Za praktični izračun uputno je upotrijebiti dijagram na slici 3.5–2.



Sl. 3.5–2. Redukcijski faktor c_s u ovisnosti o $h_š$ za određene faktore k.

Primjer 3E

Za iste podatke iz prethodnog primjera 3D, treba izračunati otpor stopala ljudskog tijela i struju kroz tijelo za slučaj dodira i koraka uporabom (3.5–8) i (3.5–9). Zadano je: $h_š = 0{,}1$ m, $k = -0{,}923$, $U_d = U_k = 212{,}2$ V.

Iz dijagrama na slici 3.5–2 za $h_š = 0{,}1$ i $k = -0{,}923$ očita se $c_s = 0{,}56$. Otpor stopala za slučaj koraka dobije se iz (3.5–7):

$$R_{rsk} = 6\rho_z c_s = 6 \cdot 2000 \cdot 0{,}56 = 6720\ \Omega$$

Struja kroz čovjeka pri naponu koraka iznosi:

$$I_{čk} = \frac{U_k}{R_č + R_{rsk}} = \frac{212{,}2}{1000 + 6720} = 0{,}028\ \text{A}$$

Otpor ljudskih stopala u slučaju dodira dobije se iz (3.5–9):

$$R_{rsd} = 1{,}5\rho_z c_s = 1{,}5 \cdot 2000 \cdot 0{,}56 = 1680\ \Omega$$

Struja kroz čovjeka pri naponu dodira iznosi:

$$I_{čd} = \frac{U_d}{R_č + R_{rsd}} = \frac{212{,}2}{1000 + 1680} = 0{,}080\ \text{A}$$

3.5.3. Usporedba rezultata izračuna struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo pri naponu dodira i koraka u točkama 3.3, 3.4 i 3.5, za primjere 3A, 3B, 3C, 3D i 3E

a) Struja koja prolazi kroz tijelo u primjeru 3A bez šljunčanog sloja u slučaju dodira iznosi $I_{čd} = 0{,}190$ A, a u slučaju koraka $I_{čk} = 0{,}143$ A, a sa šljunčanim slojem $I_{čd} = 0{,}05$ A i $I_{čk} = 0{,}016$ A. Ti izračuni upotrebljavaju pojednostavnjene formule za otpor ljudskog stopala, formule (3.3–2) i (3.3–3). Iz izračuna vidimo učinkovitost šljunčanog sloja na značajno smanjenje struje kroz čovjeka.

b) Za iste parametre, primjer 3C, uyimajući u obzir i uzajamni otpor između ljudskih stopala R_{ms}, izračuni struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo, u slučaju dodira $I_{čd} = 0{,}201$ A, a u slučaju koraka $I_{čk} = 0{,}146$ A. Tu vidimo doprinos otpora R_{ms} na neznatno povećanje struje pri dodiru i koraku. Dakle, doprinos je uzajamnog otpora između stopala negativan i zato se u izvedbi tehničkih rješenja nastoji da bude što manji.

c) Prema izračunima u poglavlju 3.5.1 za debljinu sloja šljunka 0,1 m i otpornost šljunka $\rho_š = 2000\ \Omega$ i tla $\rho_z = 80\ \Omega$ i za dodirni napon i napon koraka $U_d = U_k = 212{,}20$ V primjenom formula od (3.5–1) do (3.5–6) i dijagrama na slici 3.5–1 dobije se u slučaju koraka $I_{čk} = 0{,}028$ A, a u slučaju dodira $I_{čd} = 0{,}080$ A.

d) Za izračun otpora ljudskih stopala uzimajući u obzir koeficijent c_s, a zanemarujući uzajamni otpor između stopala R_{ms} po formulama (3.5–8) i (3.5–9), a koristeći se istim nasipom šljunka dobije se u slučaju koraka $I_{čk} = 0{,}028$ A. U slučaju dodira $I_{čd} = 0{,}080$ A. Uputno je za praktične izračune otpora ljudskih stopala i struje kroz ljudsko tijelo upotrijebiti formule kojima se dobivaju nepovoljniji rezultati koji se odnose na opasnost za čovjeka.

3.5.4. Izračun struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo za slučaj dodira (ruka – ruka)

Izračunana struja koja prolazi kroz ljudsko tijelo za slučaj dodira za bilo koji strujni put (npr. ruka – ruka, ruka – noga, glava – noga) kao i za slučaj napona koraka mora biti manja od $I_{č50}$ [32]:

$$I_{č50} = \frac{0{,}116}{\sqrt{t_s}}, \quad \text{A} \tag{3.5–11}$$

Struja $I_{č50}$ dopuštena je struja koja prolazi kroz ljudsko tijelo mase 50 kg kod frekvencije 50 ili 60 Hz. Vrijeme t_s trajanje je električnog udara u sekundama.

Prema Dalzielovim studijima iz 1968. godine [32], [L1, L2] 99,5 % svih ljudi mase veće od 50 kg može podnijeti bez vertikularnih fibrilacija struju $I_{č50}$. Za tu struju i vrijeme protjecanja t_s ljudski je organizam sposoban apsorbirati energiju od 0,0135 Ws. Kao što se vidi iz formule (3.5–11), dopuštena struja $I_{č50}$ trajanja 1 s iznosi 116 mA, a trajanja 0,1 s iznosi:

$$I_{č50} = \frac{0{,}116}{\sqrt{0{,}1}} = 0{,}367 \text{ A}$$

Osim toga Dalzielova je studija [32] omogućila definiranje dopuštene struje za osobe mase 70 kg:

$$I_{č70} = \frac{0{,}157}{\sqrt{t_s}}, \quad \text{A} \tag{3.5–12}$$

Za izračun dopuštene struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo, a s time i napona dodira i koraka treba upotrijebiti formulu (3.5–11).

[L1] Dalziel, C. F., Lagen, J. B. and Thurston, J. L.: *Electric shock*, AIEE Transactions, vol. 60, 1941. 1073–1079.

[L2] Dalziel, C. F. i Massoglia, F. P.: *Let – go. Currents and volt – voltages*, AIEE Transactions, vol. 75, part II, 1956. 49–56.

[L3] Bodier, G.: *La secrites des personnes et la question des mises à la terre dans les postes de distribution*, Bulletin de la Societé Française des Electriciens, ser 6th, vol. VII, no. 74, Oct. 1947. 545–562.

[L4] Langer, H.: *Messungen von Erderspannungen in einen 220 kV Umspanwerk*, Elektrotechnische Zietschrift, vol. 75, no. 4, Feb. 1954. 97–105.

3.6. JAKOST ELEKTRIČNOG UDARA, PSIHOLOGIJA I PATOLOGIJA TE PRUŽANJE PRVE POMOĆI UNESREĆENOMU [51]

3.6.1. Jakost električnog udara

Najveći broj nesretnih slučajeva izazvanih elektricitetom događa se zbog kontakta s izmjeničnom strujom, obično 50 ili 60 Hz, pa je ovo poglavlje posvećeno psihološkom i patološkom djelovanju ozljeda prouzročenih električnom strujom te frekvencije. Sljedeća se razmatranja ne odnose na druge vrste struja, primjerice istosmjerne i pulzirajuće, za koje treba pogledati drugu literaturu.

Faktori koji određuju jakost električnog udara jesu električni otpor ljudskog tijela i strujni put.

a) Električni otpor tijela

Ljudsko se tijelo ponaša kao prostorni vodič za struju od 50 ili 60 Hz, iako određeni nalazi ukazuju na to da struja većim dijelom teče duž krvnih žila. Na tim frekvencijama tijelo se uglavnom ponaša kao djelatni otpor. Najveći otpor tijelo ima na koži, unutrašnjost tijela ima, uglavnom, konstantan otpor od oko 500 Ω. Otpor je kože promjenjiv i može biti manji od 1 000 Ω, za vrlo vlažne uvjete i veći od 100 000 Ω, za debelu žuljevitu kožu.

b) Strujni put

Budući da se tijelo ponaša kao prostorni vodič, gustoća je struje najveća duž crte koja spaja točke dodira. Zbog toga je vrlo važno utvrditi strujni put i organe duž tog strujnog puta, čime se određuju i učinci udara. Najčešći je strujni put između jednoga i drugoga gornjeg ekstremiteta ili jednoga gornjeg i jednoga donjeg ekstremiteta. Taj strujni put obuhvaća srce i dišne organe, odnosno mišiće grudnog koša. Samo oko 3 % smrtonosnih udara dogodilo se prolaskom struje kroz glavu, gdje je smješten centar za kontrolu disanja.

3.6.2. Psihologija i patologija

Tkivo je tijela jako osjetljivo na električne struje. Struja od 100 μA, koja se propušta kroz srčanu aortu koja je u izravnom dodiru sa srčanim zidom, prouzrokuje ventrikularnu fibrilaciju.

a) Struja otpuštanja i smrt od asfiksije

Početna struja osjetljivosti na vodič pod naponom koji se drži u ruci iznosi oko 1 mA. Ako se struja postupno povećava, osjeća se briđenje, toplina i bol, a pri struji od 10 mA prosječni odrasli muškarac ne može otpustiti vodič, jer su mišići podlaktice u nesvjesnom grču. Kod većine električnih udara struja prolazi preko grudnog koša i, ako je struja oko 20...40 mA, mišići grudnog koša u nesvjesnom su grču, a disanje

prestaje. To stanje može za nekoliko minuta prouzročiti smrt od asfiksije, s pojavom hipoksije i duboke mješovite acidoze. Međutim, ako se struja prekine u roku od 2...3 minute, disanje spontano počinje i oporavak je obično brz.

b) Trajno zaustavljanje disanja

Trajno zaustavljanje disanja događa se pri električnom udaru kroz centar koji kontrolira disanje i koji se nalazi u donjem stražnjem dijelu mozga. Urguhart i Noble 1929. godine pokazali su da prolazak izmjenične struje kroz leđnu moždinu stvara privremene smetnje. Također su ustanovili da se prenošenje živčanog impulsa duž dijela izloženoga perifernog živca može spriječiti propuštanjem izmjenične struje kroz taj dio. Ta je pojava nazvana *blok izmjenične struje* i objašnjava kliničke slučajeve kod kojih se disanje nakon prestanka udara nastavilo. Otada se tvrdi da, u odsutnosti ventrikularne fibrilacije, trajni prestanak disanja nastupa samo u slučaju prolaska struje kroz centar za disanje. Međutim, kao što je već navedeno, samo oko 3 % smrtonosnih električnih udara nastaje tim strujnim putom. Prije nekoliko godina, Urghartova i Nobleova istraživanja, s uzbudljivim opisima nesretnih slučajeva kod kojih je struja protekla između glave i udova prouzrokujući dulji prestanak disanja dovela su do spoznaje da davanje umjetnog disanja pomaže.

c) Ventrikularna fibrilacija

To je stanje poremećenog rada srca. Nastaje od električnog udara koji prođe preko grudnog koša. Kod ventrikularne fibrilacije zakazuje rad srca, prestaje puls i cirkulacija. Vrlo se rijetko spontano uspostavlja normalan srčani ritam, te je ako se odmah ne ukaže pomoć rezultat gotovo uvijek smrtonosan.

Nekoliko je istraživača proučavalo struje koje prouzrokuju ventrikularnu fibrilaciju i pritom su utvrđene dvije značajne činjenice. Prvo, srce fibrilira samo ako struja prolazi u vrijeme kada se komore šire (T-val elektrokardiograma), odnosno u vrijeme koje obuhvaća do 25 % jednoga srčanog ciklusa. Drugo, što je manja struja, duže je vrijeme koje mora proći do pojave fibrilacije. Izraz koji daje ovisnost najveće struje koja ne izaziva fibrilaciju o trajanju udara ima oblik:

$$\underset{\text{od}\,8\,\text{ms}}{\overset{\text{do}\,5\,\text{s}}{\left[I = \frac{116}{\sqrt{t}} \right]}}, \quad \text{A} \tag{3.6–1}$$

gdje je:

I dopuštena struja koja prolazi kroz ljudsko tijelo za vrijeme od 8 ms do 5 sekundi

t vrijeme strujnog udara, s

Taj izraz vrijedi samo za vrijeme od 8 ms do 5 s.

Ventrikularna fibrilacija nastupa samo za određene jakosti struje. Ako se struja udara povećava, vjerojatnost pojave fibrilacije postaje manja i, kada se prijeđe jakost od nekoliko ampera, fibrilacija se ne pojavljuje. Ta činjenica čini osnovu kliničke defibrilacije i objašnjava zašto žrtve udara visokog napona često ostaju žive, i pored znatnih opekotina.

d) Električne opekline (Jouleove opekline)

Prolazak električne struje duž bilo kojeg vodiča praćen je oslobađanjem topline. Prema Jouleovom zakonu, oslobođena toplina iznosi I^2Rt; I je struja, R je otpor, i t je vrijeme toka struje. Budući da koža ima najveći otpor od svih dijelova tijela, najvjerojatnije je da se opekline pojave na njoj. Takve opekline mogu trajati dulje nego što na prvi pogled izgledaju. Liječenje je često sporo i može biti praćeno velikim ožiljcima.

e) Opekline od pražnjenja

Ako se uzemljeni vodič približi drugom vodiču pod visokim naponom, zračna izolacija između njih može biti probijena i pritom se javlja električno pražnjenje. Ionizacija zraka smanjuje njegov otpor, što omogućuje povećanje struje, tako da se stvara električni luk. Ako se čovjek, kao uzemljeni vodič, približi visokonaponskom vodu, njegovo tijelo gori pod djelovanjem električnog luka, iako nije došlo u izravan dodir s vodičem. Zbog smanjenja otpora zraka i velike površine kože koja gori (što smanjuje otpor kože), mogu se pojaviti velike struje. Tako je žrtva izložena dvostrukom djelovanju: plamenu električnog luka i toplini koja se oslobađa pri prolazu struje. Opekline su često još ozbiljnije zbog toga što se zapali i odjeća. Budući da se nesretni slučajevi s opeklinama od pražnjenja obično događaju pri visokom naponu, struje koje se pojavljuju često su suviše velike da bi prouzročile ventrikularnu fibrilaciju. Također, budući da žrtve obično ne dodiruju vodič (praktično se nikad ne »lijepe«), brzo dolazi do prekida dodira i time se luk gasi. Zbog toga struja obično vrlo kratko vrijeme prolazi kroz žrtvu.

f) Sekundarni učinci

Zabilježeni su mnogi naknadni učinci električnog udara, ali literatura često opisuje samo izolirane slučajeve i bolesti koje prate udar, te ne postoji prava evidencija o uzročnom odnosu. Međutim, nekoliko je posljedica dokazano.

Angina electrica može nastati nakon električnog udara kod relativno mladih ljudi i ne može se klinički razlikovati od *angine pektoris*. Pojavljuje se gotovo uvijek nakon nekoliko tjedana ili mjeseci, ne izazivajući naknadno posljedice.

Električni katarakt trajno je stanje koje može nastati poslije određenih vrsta električnih udara, obično poslije jakih udara kroz glavu.

Hromoproteinurija, koja katkad prouzrokuje jaka oštećenja bubrega, može nastati nakon jakih električnih udara koji su izazvali snažna grčenja mišića s oslobođenjem mioglobina. Ona je analogna u svim vidovima *kraš-sindromu*, kod kojeg se s oštećenih mišića oslobađaju mišićni proteini.

Opisane su i razne neurološke posljedice, a moguće je da neke od njih mogu nastati zbog oštećenja kralježničkih živaca zbog žestokih pokreta kralježnice prouzročenih jakim grčenjima mišića za vrijeme trajanja električnog udara. Pored toga, ne smije se nikako zaboraviti da udari od nekoliko stotina miliampera prolaze između sljepoočnica u terapiji elektrošokom i da su pritom sporedni efekti na središnjem živčanom sustavu vrlo rijetki.

3.6.3. Prva pomoć

Pokazalo se da su uzroci trenutačne smrti od električnog udara:

- prestanak cirkulacije zbog ventrikularne fibrilacije
- rjeđe, asfiksija zbog isprekidanog grčenja mišića grudnog koša, i
- trajni prestanak disanja, prouzročen prolaskom struje kroz centar za disanje u donjem dijelu mozga.

Prva se pomoć treba, prema tome, usmjeriti na ugroženi sustav. Prestanak disanja može komplicirati prestanak cirkulacije. Zato se u svim slučajevima ništa ne gubi primjenom brzoga i pravilnoga umjetnog disanja, koje treba nastaviti dok ponovno ne počne disanje ili dok se ne ustanovi smrt. Mora se naglasiti da se rijetko događa da se produženim umjetnim disanjem ožive žrtve električnog udara kod kojih je struja prošla kroz centar za disanje.

Suvremeni je postupak prve pomoći za slučaj prestanka cirkulacije vanjska masaža srca. Važno je shvatiti da ta mjera ne obnavlja rad srca, nego preuzima njegovu funkciju u održavanju cirkulacije. Iz tog razloga jednom započeta masaža mora se nastaviti dok se ne pruži liječnička pomoć. Vanjska masaža srca potencijalno je opasna tehnika i, ako se nepravilno primjenjuje, može ugroziti život žrtve. Očigledno je da je odgovarajuća obuka važna i za dijagnozu prestanka cirkulacije i za tehniku vanjske masaže srca.

Postupak prve pomoći kod električnih opeklina malo se razlikuje od postupka kod toplinskih opeklina. Budući da opekline od visokog napona mogu biti praćene oslobađanjem kromoproteina u krvi i urinu, kao preventivna mjera preporučuje se brza alkalna terapija. Opekline od Jouleovog toplinsko učinka struje zahtijevaju brižljivo njegovanje, jer je liječenje dugotrajno zbog dubinskog uništavanja tkiva.

[L1] Angelis, A. L., Lee, W. R., Zoledziowski, S.: *Experimental investigations of the effects of direct current electric shock on respiration*, British Journal of Industrial Medicine, 22, 210, 1965.

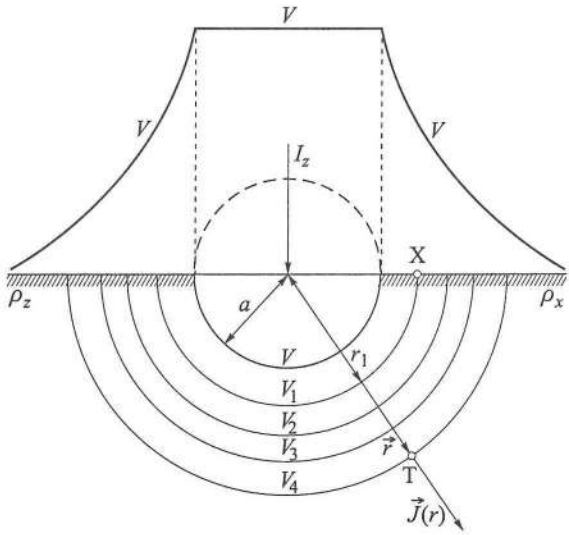
[L2] Lee, W. R.: *Death from the electric shock in 1962 and 1963*, British Medical Journal, 2, 616, 1965.

[L3] Lee, W. R., Zoledziowski, S., Temiyaschol, S.: *Effects of pulsed currents on respiration and the heart*, British Journal of Industrial Medicine, 24, 220, 1967.

4. TEORIJSKE POSTAVKE ZA IZRAČUN OTPORA UZEMLJENJA

4.1. POLUKUGLASTI I KUGLASTI UZEMLJIVAČ [4]

Teorijski je najjednostavniji uzemljivač oblika polukugle, ukopan u zemlju prema slici 4.1–1. Takav uzemljivač u praksi se rijetko upotrebljava. Međutim, njime se mogu aproksimirati izračuni za druge jednostavne uzemljivače, koji se redovito upotrebljavaju u praksi, pa je od interesa odrediti njegove karakteristike.



Sl. 4.1–1. Razdioba potencijala za uzemljivač u obliku kugle.

Pri potencijalu polukuglastog uzemljivača V teče struja s površine uzemljivača u zemlju otpornosti ρ_z. Tok je struje radijalan. Ako ukupna struja I_z teče polukuglastim uzemljivačem, onda kuglastim uzemljivačem teče struja $2I_z$. Gustoća struje $J(r)$ u točki T udaljenoj od centra kuglastog uzemljivača za r iznosi:

$$J(r) = \frac{2I_z}{4\pi r^2}\vec{r}_0 = J(r)\cdot\vec{r}_0, \quad r \geq a \tag{4.1–1}$$

gdje je:

a polumjer kuglastog uzemljivača

$\vec{r}_0$ jedinični vektor u smjeru polumjera.

Jakost električnog polja $\vec{E}(r)$ u točki udaljenoj r od centra uzemljivača iznosi:

$$\vec{E}(r) = \rho_z J(r)\vec{r}_0, \quad r \geq a \tag{4.1–2}$$

Potencijal uzemljivača u odnosu na točku X koja je na udaljenosti od središta uzemljivača $r = r_1$, iznosi:

$$V(r_1) = \int_{r=a}^{r_1} J(r)\rho_z \mathrm{d}r \tag{4.1–3}$$

Potencijal uzemljivača u odnosu na beskonačno udaljenu točku, dobije se stavljanjem $r_1 \to \infty$

$$V = \frac{\rho_z I_z}{2\pi a} \tag{4.1–4}$$

Izračunavanjem integrala (4.1–3) dobije se potencijal u odnosu na točku na udaljenosti r_1 od središta polukuglastog uzemljivača:

$$V(r_1) = \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r_1}\right) \tag{4.1–5}$$

Otpor uzemljenja polukuglastog uzemljivača R_z prema beskonačno udaljenoj točki je:

$$R_z = \frac{V}{I_z} = \frac{\rho_z}{2\pi a} \tag{4.1–6}$$

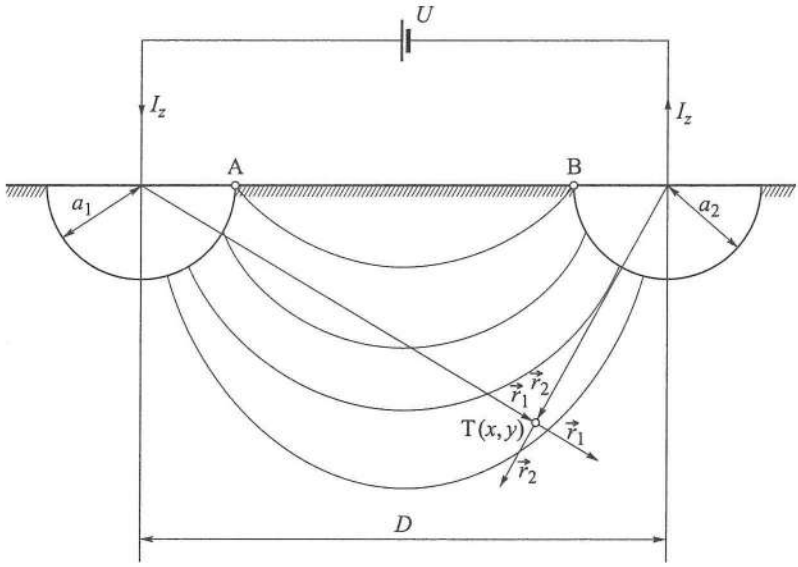
Raspodjela potencijala na površini zemlje od polukuglastog uzemljivača prikazana je na slici 4.1–1.

4.1.1. Dva polukuglasta uzemljivača položena na površinu zemlje

Sljedeći jednostavniji uzemljivač čine dvije polukugle položene na površinu zemlje na udaljenosti između središta polukugli D, kako je to prikazano na slici 4.1–2.

Pritom je uvjet da je udaljenost između polukugli D znatno veća od njihovih polumjera ($D \gg a_1, D \gg a_2$), kako prisutnost jedne polukugle ne bi utjecala na raspodjelu struje na površini druge polukugle.

Pod naponom U kroz polukugle i zemlju teče električna struja I_z zatvarajući strujni krug kako je prikazano na slici 4.1–2.



Sl. 4.1–2. Dva polukuglasta uzemljivača položena na površini zemlje.

Gustoća električne struje u točki T(x, y) može se dobiti superpozicijom gustoće dvaju polukuglastih uzemljivača:

$$\vec{J}(x,y) = \frac{2I_z}{4r_1^2\pi}\vec{r}_{01} + \frac{-2I_z}{4r_2^2\pi}\vec{r}_{02} \tag{4.1–7}$$

gdje je:

r_1, r_2 udaljenost točke T(x, y) od središta polukugli

$\vec{r}_{01}$, $\vec{r}_{02}$ jedinični vektori u pravcu polumjera r_1 i r_2.

Na sličan način računa se jakost električnog polja u istoj točki:

$$\vec{E}(x,y) = \frac{\rho_z I_z}{2r_1^2\pi}\vec{r}_{01} - \frac{\rho_z I_z}{2r_2^2\pi}\vec{r}_{02} \tag{4.1–8}$$

Potencijal između polukuglastih uzemljivača iznosi:

$$V = \int \vec{E}(x,y)\mathrm{d}\vec{r} \tag{4.1–9}$$

Izabirući integraciju po liniji $\overline{AB}$ na površini tla dobiva se:

$$V = \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{D-a_2} + \frac{1}{a_2} - \frac{1}{D-a_1}\right) \tag{4.1–10}$$

Ako su obje polukugle jednake veličine, $a_1 = a_2 = a$ (4.1–10) prelazi u jednostavniji oblik:

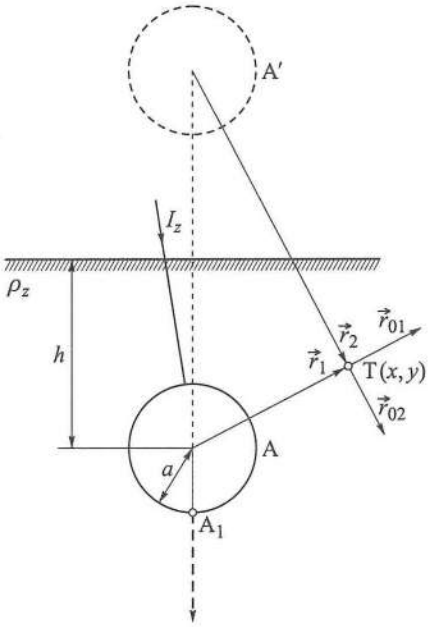
$$V = \frac{\rho_z I_z}{\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D-a}\right) \tag{4.1–11}$$

Otpor uzemljenja između dvaju polukuglastih uzemljivača iznosi:

$$R_z = \frac{V}{I_z} = \frac{\rho_z}{\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{D-a}\right) \tag{4.1–12}$$

4.1.2. Kuglasti uzemljivač ukopan u zemlju [4]

Druga je jednostavna konfiguracija uzemljivač u obliku kugle ukopan u zemlju na dubini h od središta kugle do površine zemlje, kako je to prikazano na slici 4.1–3. Rješenje se dobiva usporedbom likova kako što je to prikazano na slici 4.1–3; punom crtom prikazan je stvarni uzemljivač, a crtkanom crtom njegov lik A′.



Sl. 4.1–3. Kuglasti uzemljivač ukopan u zemlju na dubini h od središta kugle.

Ako stvarni kuglasti uzemljivač A odvodi struju I_z u zemlju onda istu toliku struju odvodi njegov lik A′. Razdioba je električne struje po površini ukopane kugle nejednolika i točno je rješenje veoma složeno. Pojednostavnjenja se mogu primijeniti ako je dubina ukopa h mnogo veća od polumjera kuglastog uzemljivača, $h \gg a$. Tada je struja približno ravnomjerno raspodijeljena po površini kugle, što je za praktične uvjete polaganja dubinskih uzemljivača dosta realno. U tom slučaju gustoća električne struje, jakost električnog polja i potencijal u točki T(x, y) računaju se iz sljedećih izraza:

$$\vec{J}(x,y) = \frac{I_z}{4\pi r_1^2}\vec{r}_{01} + \frac{I_z}{4\pi r_2^2}\vec{r}_{02} \tag{4.1–13}$$

$$\vec{E}(x,y) = \frac{\rho_z I_z}{4\pi r_1^2}\vec{r}_{01} + \frac{\rho_z I_z}{4\pi r_2^2}\vec{r}_{02} \tag{4.1–14}$$

$$V = \int \vec{E}(x,y)\mathrm{d}\vec{r} \tag{4.1–15}$$

gdje je:

r_1, r_2 udaljenost promatrane točke T(x, y) od središta kuglastog uzemljivača i njegovog lika

$\vec{r}_{01}, \vec{r}_{02}$ jedinični vektori.

Potencijal kuglastog uzemljivača u točki T(x, y) uzemljivača dobiva se iz formule (4.1–15) integriranjem po dužini bilo koje crte koja počinje na površini kugle i završava u beskonačnosti. Takva crta prikazana je na slici 4.1–3 s početkom u točki A_1. Nakon integriranja po toj se liniji dobiva:

$$V = \frac{\rho_z I_z}{4\pi}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{2h+a}\right) \tag{4.1–16}$$

Potencijal je točke T(x, y) koja je na udaljenosti r_1 od kuglastog uzemljivača i na udaljenosti r_2 od njegova lika:

$$V = \frac{\rho_z I_z}{4\pi}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \tag{4.1–17}$$

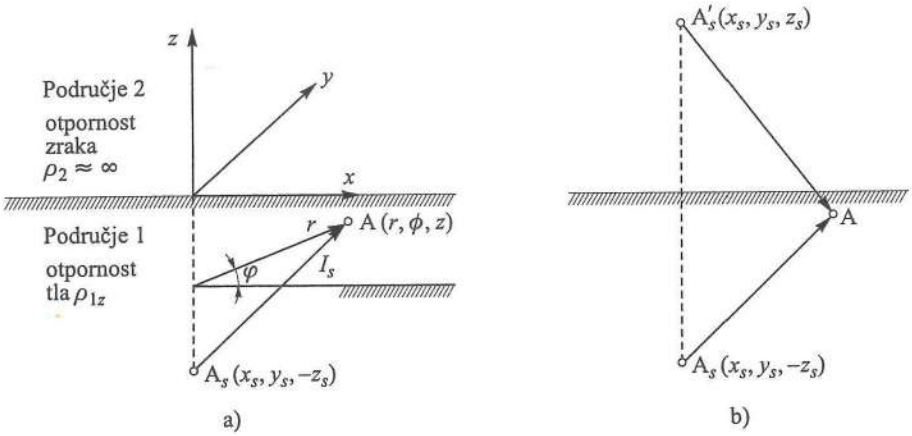
Otpor uzemljenja kuglastog uzemljivača polumjera a ukopanog na dubini h iznosi:

$$R_z = \frac{V}{I_z} = \frac{\rho_z}{4\pi}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{2h+a}\right) \tag{4.1–18}$$

Dobili smo vrlo važnu formulu (4.1–18) za izračun otpora kuglastog uzemljivača.

4.2. OSNOVE NUMERIČKIH METODA ZA ANALIZU SUSTAVA UZEMLJENJA [4]

Pretpostavimo beskonačno mali uzemljivač u točki A_s, slika 4.2–1. Neka iz tog točkastog uzemljivača teče struja I_s u zemlju. Postavlja se pitanje koji je potencijal točke A u zemlji.



Slika 4.2–1. Potencijal točke A za točkasti izvor struje.

Potencijal $V(r, \phi, z)$ u točki $A(r, \phi, z)$ mora zadovoljiti Laplaceovu jednadžbu:

$$\nabla^2 V(r,\phi,z) = \frac{1\partial}{r\partial r}\left(r\frac{\partial V(r,\phi,z)}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 V(r,\phi,z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V(r,\phi,z)}{\partial z^2} = 0 \tag{4.2–1}$$

r, ϕ i z koordinate su točke A u cilindričnome koordinatnom sustavu.

Zbog simetrije raspodjela potencijala ne ovisi o koordinati ϕ, te je $V(r, \phi, z) = V(r, z)$ i u ovom slučaju Laplaceova je jednadžba:

$$\nabla^2 V(r,z) = \frac{1\partial}{r\partial r}\left(r\frac{\partial V(r,z)}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial^2 V(r,z)}{\partial z^2} = 0 \tag{4.2–2}$$

Rješenje te jednadžbe [L3] izražava se Besselovim funkcijama nultog reda I_0:

$$V(r,z) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi}\int_0^\infty \Theta(K)\, I_0(Kr)\, e^{\pm Kz}\, \mathrm{d}K \tag{4.2–3}$$

K je pretpostavljena varijabla, $\Theta(K)$ je proizvoljna funkcija od K i određuje se iz rubnih uvjeta.

Rješenje (4.2–3) ima dvije mogućnosti, predznak »+« odgovara prostiranju u smjeru $+z$ a predznak »–« odgovara smjeru $-z$. Rješenje za potencijal zraka je:

$$V_2(r,z) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty \Theta_2(K) I_0(Kr) e^{-Kz} \mathrm{d}K, \quad z > 0 \tag{4.2–4}$$

Član s e^{Kz} mora se izostaviti jer $V_2(r, z) \to 0$ ako $z \to \infty$. Opće je rješenje za potencijal u tlu:

$$V_1(r,z) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty I_0(Kr) e^{-K(z-z_s)} \mathrm{d}K + \frac{I_s \rho_1}{4\pi} \int_0^\infty \Theta_1(K) I_0(Kr) e^{Kz_s} \mathrm{d}K, \quad z \le 0 \tag{4.2–5}$$

Ovdje je slično izostavljen član s e^{-Kz} jer $V_1(r, z) \to 0$ ako $z \to -\infty$.

U gornje dvije jednadžbe pojavljuju se dvije nepoznate funkcije $\Theta_1(K)$ i $\Theta_2(K)$. Rubni uvjeti na prijelazu dviju sredina daju dvije jednadžbe čija su rješenja $\Theta_1(K)$ i $\Theta_2(K)$. Na prijelazu dviju sredina potencijal i struja moraju biti kontinuirane funkcije, te ti zahtjevi rezultiraju sljedećim rubnim uvjetima:

$$V_1(r,0) = V_2(r,0) \qquad \frac{\rho_1 \partial V_1(r,0)}{\partial z} = \frac{\rho_2 \partial V_2(r,0)}{\partial z} \tag{4.2–6}$$

Slijedi:

$$V_2(r,0) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty \Theta_2(K) I_0(Kr) \mathrm{d}K$$

$$V_1(r,0) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty I_0(Kr) e^{+Kz_s} \mathrm{d}K + \frac{I_s \rho_1}{4\pi} \int_0^\infty \Theta_1(K) I_0(Kr) \mathrm{d}K$$

$$\frac{\rho_{1z} \partial V_1(r,0)}{\partial z} = \frac{I_s^K}{4\pi} \int_0^\infty I_0(Kr) e^{+Kz_s} \mathrm{d}K + \frac{I_s^K}{4\pi} \int_0^\infty \Theta_1(K) I_0(Kr) \mathrm{d}K$$

$$\frac{\rho_2 \partial V_2(r,0)}{\partial z} = 0 \tag{4.2–7}$$

Nakon uvrštenja rubnih uvjeta dobije se:

$$\Theta_2(K) = e^{+Kz_s} + \Theta_1(K), \qquad e^{-Kz_s} + \Theta_1(K) = 0$$

te je rješenje za $\Theta_1(K)$ i $\Theta_2(K)$:

$$\Theta_1(K) = e^{Kz_s} \tag{4.2–8}$$

$$\Theta_2(K) = 2e^{Kz_s} \tag{4.2–9}$$

Rješenje je za potencijal u zraku:

$$V_2(r,z) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty 2I_0(Kr)\, e^{-K(z-z_s)} \mathrm{d}K \tag{4.2–10}$$

a za potencijal u zemlji:

$$V_1(r,z) = \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty I_0(Kr)\, e^{-K(z-z_s)} \mathrm{d}K + \frac{I_s \rho_{1z}}{4\pi} \int_0^\infty I_0(Kr)\, e^{-K(z+z_s)} \mathrm{d}K \tag{4.2–11}$$

Za primjenu tih formula razmotrit ćemo samo potencijal u tlu i na površini tla. Integral koji se pojavljuje u jednadžbi (4.2–10) izračuna se uporabom sljedećeg identiteta Besselove funkcije:

$$\int_0^\infty I_0(Kr) e^{Ka} \mathrm{d}K = \frac{1}{\left(r^2 + a\right)^{0,5}}$$

te je konačno rješenje:

$$V_1(r,z) = \frac{\rho_{1z} I_s}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\left[r^2 + \left(z - z_s\right)^2\right]^{0,5}} + \frac{1}{\left[r^2 + \left(z + z_s\right)^2\right]^{0,5}} \right\} \tag{4.2–12}$$

U Kartezijevim koordinatama (4.2–12) potencijal u zemlji ima oblik:

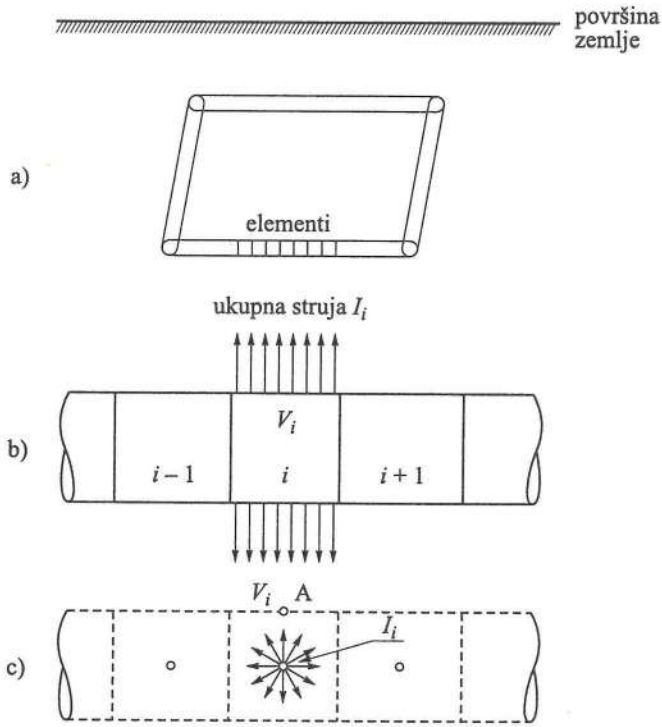
$$V_1(r,z) = \frac{\rho_{1z} I_s}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\left[\left(x - x_s\right)^2 + \left(y - y_s\right)^2 + \left(z - z_s\right)^2\right]^{0,5}} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\left[\left(x + x_s\right)^2 + \left(y + y_s\right)^2 + \left(z + z_s\right)^2\right]^{0,5}} \right\} \tag{4.2–13}$$

Dobiveni rezultati interpretiraju se na sljedeći način. Potencijal u tlu identičan je potencijalu između dvaju točkastih izvora struje iznosa I_s u točkama $A'_s(x_s, y_s, z_s)$ i A_s $(x_s, y_s, -z_s)$ u neograničenom području otpornosti tla ρ_{1z}. Drugim riječima utjecaj granične plohe između tla i zraka očituje se u generiranju točkastog lika nasuprot granične plohe. To je ilustrirano na slici 4.2–1.b). Taj je rezultat osnova svim numeričkim metodama analize sustava uzemljenja.

4.3. MATRIČNA METODA ZA ANALIZU SUSTAVA UZEMLJENJA [4]

Matrična metoda temelji se na podjeli sustava uzemljenja na male elemente. Razmotrimo jednostavan sustav uzemljenja na slici 4.3–1.a). Sustav je podijeljen na male elemente. Iz i-tog elementa teče struja I_i u svim smjerovima u zemlju, kako je to prikazano na slici 4.3–1.c). Ako je element mali, može se predstaviti točkastim izvorom struje I_i smještenim u sredini elementa. Isto načelo može se primijeniti za elemente $i-1$, $i+1$, kao i za ostale elemente.



Sl. 4.3–1. Sustav uzemljenja s točkastim izvorom struje: a) jednostavno uzemljenje, b) mali elementi $i-1$, i, $i+1$, c) matematički model i-tog elementa.

Potencijal i-tog elementa u točki A iznosi (4.2–13):

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} f\left(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) I_j \qquad (4.3\text{–}1)$$

gdje je:

$$f\left(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) =$$

$$= \frac{\rho_z}{4\pi}\left\{\frac{1}{\left[\left(x_{Ai}-x_j\right)^2+\left(y_{Ai}-y_j\right)^2+\left(z_{Ai}-z_j\right)^2\right]^{0,5}}+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{\left[\left(x_{Ai}+x_j\right)^2+\left(y_{Ai}+y_j\right)^2+\left(z_{Ai}+z_j\right)^2\right]^{0,5}}\right\}$$

$i = 1, 2, 3, \ldots n$

n broj elemenata
(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}) koordinate točke A na površini i-tog segmenta
(x_j, y_j, z_j) koordinate središta j-tog segmenta
I_j električna struja koja izlazi iz j-tog segmenta.

Potencijali elemenata $i = 1, 2, 3, \ldots n$ redom iznose:

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{j=1}^{n} f\left(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) I_j \\ V_2 &= \sum_{j=1}^{n} f\left(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) I_j \\ &\vdots \\ V_n &= \sum_{j=1}^{n} f\left(x_{An}, y_{An}, z_{An}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) I_j \end{aligned} \tag{4.3–2}$$

Ako su potencijali V_i poznati, onda se sustav jednadžbi (4.3–2) može riješiti, tj. izračunati struje I_j. Kada se odrede struje I_j, potencijal $V(x, y, z)$ u bilo kojoj točki (x, y, z) u zemlji može se izračunati po formuli:

$$V(x, y, z) = \sum_{j=1}^{n} f\left(x, y, z, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1}\right) I_j \tag{4.3–3}$$

Sustav uzemljenja gradi se od bakrenih ili željeznih pocinčanih vodiča koji imaju visoku vodljivost u odnosu na tlo. Zato su vodiči sustava uzemljenja na jednakom potencijalu, a zemlja na povišenom potencijalu. Tako je potencijal svih elemenata jednak: $V_1 = V_2 = V_3 = \ldots = V_n = V$.

Sustav jednadžbi (4.3–2) može se pisati u matričnom obliku:

$$V = [\mathbf{VDF}][\mathbf{I}] \tag{4.3–4}$$

gdje je:

$$[I]^T = [I_1 \;\; I_2 \;\; \ldots \;\; I_n]$$

$$(VDF)_{i,j} = f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \rho_z^{-1})$$

Struja $[I]$ izračuna se iz:

$$[I]^T = [VDF]^{-1} V \tag{4.3–5}$$

Iz jednadžbe (4.3–5) vidi se da je struja proporcionalna potencijalu uzemljivača. Tako se otpor uzemljenja R_z može izračunati dijeljenjem potencijala uzemljivača i ukupne struje uzemljivača:

$$I_T = \sum_{j=1}^{n} I_j = 1^T [I] \tag{4.3–6}$$

gdje je:

$$1^T = [1 \;\; 1 \;\; \ldots \;\; 1]$$

Dobiva se:

$$R_z = \frac{V}{I_T} \tag{4.3–7}$$

Ta se metoda naziva *matrična metoda* zato što sadrži matricu distribucijskih faktora potencijala *VDF*. Elementi te matrice nazivaju se distribucijski faktori potencijala zato što određuju potencijal u zadanoj točki. Distribucijski faktori potencijala imaju fizičko značenje otpora, ali to nije uvijek otpor uzemljenja, već otpor između uzemljivača, prijelazni otpor između uzemljivača i slično; sve ovisi o vrsti uzemljivača i prostornom razmještaju uzemljivača.

4.4. NUMERIČKE METODE PRORAČUNA SUSTAVA UZEMLJENJA [5]

U nizu okolnosti do kojih dolazi u praksi postavlja se pitanje procjene međusobnog utjecaja uzemljivača različitih blisko postavljenih objekata, te utjecaja postojećih metalnih instalacija u tlu koje nisu u neposrednoj svezi s uzemljivačem. Potreba za procjenom spomenutih utjecaja pojavljuje se kod analize uvjeta spajanja i razdvajanja različitih uzemljenja u okviru istog postrojenja (npr. radnog i zaštitnog uzemljenja u TS 10(20)/0,4 kV) ili uzemljenja različitih objekata u krugu ili neposrednoj blizini velikih postrojenja (elektrana, industrijskih kompleksa i dr.).

Ta metoda daje opći postupak za računalnu analizu [L1].

4.4.1. Matrični model uzemljivača [5]

Promatrajmo dva uzemljivača a i b bilo kojeg oblika, sastavljena od n_a odnosno n_b pravocrtnih elemenata. Pod pojmom uzemljivač obuhvaćeni su i svi prirodni uzemljivači koji se mogu predočiti kombinacijama pravocrtnih vodiča, kao što su cjevovodi, kabeli, čelične armature i drugi metalni predmeti ukopani u tlo. Opisani matrični modeli prilagođeni su primjeni na računalu i mogu poslužiti za izradu općih programa za projektiranje postrojenja.

Naponi i struje koje se odvode u tlo putem elemenata uzemljivača zadovoljavaju Maxwellove jednadžbe. Spomenute jednadžbe, napisane matrično, imaju oblik:

$$\left[\frac{[u_a]}{[u_b]}\right] = \left[\frac{[r_{aa}]}{[r_{ba}]}\right] + \left[\frac{[r_{ab}]}{[r_{bb}]}\right] \cdot \left[\frac{[i_a]}{[i_b]}\right] \tag{4.4–1}$$

Ta jednadžba vrijedi za homogeno, i za nehomogeno tlo. $[i_a]$ i $[i_b]$ stupčaste su matrice struja elemenata uzemljivača a i b. $[u_a]$ i $[u_b]$ stupčaste su matrice napona tih elemenata, računanih prema beskonačno udaljenoj *neutralnoj zemlji*. Budući da se svi elementi uzemljivača a i svi elementi uzemljivača b nalaze na jednakim potencijalima, vrijedi:

$$[u_a] = [1_a] \cdot [u_a] \tag{4.4–2}$$

$$[u_b] = [1_b] \cdot [u_b] \tag{4.4–3}$$

$[1a]$ i $[1b]$ jedinične su matrice vektora od n_a i n_b elemenata.

Matrice na desnoj strani jedinične su matrice od $n_a \times 1$ odnosno od $n_b \times 1$ elemenata. $[r_{aa}]$ i $[r_{bb}]$ matrice su vlastitih i međusobnih otpornosti elemenata uzemljivača a i b. Obje su matrice kvadratne i simetrične od $n_a \times n_a$ odnosno $n_b \times n_b$ elemenata. $[r_{ab}]$ i $[r_{ba}]$ pravokutne su matrice međusobnih otpornosti elemenata uzemljivača a i uzemljivača b i obrnuto od $n_a \times n_b$ odnosno $n_b \times n_a$ elemenata. Pritom je

$$[r_{ba}] = [r_{ab}]^T \tag{4.4–4}$$

Međusobni utjecaj uzemljivača proučava se u uvjetima kada jedan od njih odvodi struju kvara. Pretpostavimo da je to uzemljivač a. Tada, ako se s i_k označi struja kvara, vrijedi:

$$i_k = [1_a]^T [i_a] \tag{4.4–5}$$

Da bi se ustanovile sve karakteristične veličine promatranog sustava uzemljenja, treba izračunati struje $[i_a]$ i $[i_b]$, napon u_a, a također, u općem slučaju, i napon u_b, kada on nije određen vanjskim čimbenicima. Nepoznatih veličina ima, prema tome, $n_a + n_b + 2$. Kako (4.4–1) i (4.4–5) daju ukupno $n_a + n_b + 1$ jednadžbi, preostala jedna jednadžba potrebna za potpuno definiranje zadataka, određena je geometrijskim

odnosom uzemljivača b prema drugim uzemljenim dijelovima odnosno referentnoj zemlji.

Mi ćemo obraditi tri važna slučaja. Razmotrit ćemo slučaj kada uzemljivač b nije spojen s drugim uzemljenim dijelovima, zatim kada je spojen s dobro uzemljenim objektom tako da se nalazi na nultom potencijalu i najzad, slučaj kada je spojen s uzemljivačem a.

4.4.2. Uzemljivač *b* nije spojen s drugim uzemljenim dijelovima

U promatranom je slučaju, prema generaliziranom zakonu, zbroj struja elemenata uzemljivača b jednak nuli, tako da vrijedi:

$$[1_b]^T[i_b] = 0 \tag{4.4–6}$$

Jednadžba (4.4–6) zajedno s jednadžbama (4.4–1) – (4.4–3) i (4.4–5) tvori sustav linearnih jednadžbi iz kojeg se mogu izračunati otpor uzemljenja uzemljivača, napon dodira i napon koraka. Napisan matrično, sustav jednadžbi uzemljivača ima oblik:

$$\begin{bmatrix} [1_a]^T & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [1_b]^T & [0] & [0] \\ [r_{aa}] & [r_{ab}] & -[1_a] & [0] \\ [r_{aa}] & [r_{bb}] & [0] & -[1_b] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_a] \\ [i_b] \\ [u_a] \\ [u_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_k] \\ [0] \end{bmatrix} \tag{4.4–7}$$

ili kraće

$$[A] \cdot \begin{bmatrix} [i_a] \\ [i_b] \\ u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_k \\ [0] \end{bmatrix} \tag{4.4–8}$$

Jednadžbe (4.4–7 i 4.4–8) rješavaju se na računalu jednim od rutinskih postupaka.

Inverzija matrice izvodi se rutinskim potprogramom. Tako se dobiju tražene veličine: $[i_a]$, $[i_b]$, u_a i u_b.

Otpor uzemljenja uzemljivača iznosi:

$$R_z = \frac{u_a}{i_k}$$

$$V_T = [Y(T)] \cdot \begin{bmatrix} [i_a] \\ [i_b] \end{bmatrix} \tag{4.4–9}$$

gdje je:

$[Y(T)]$ stupčasta matrica od $1 \times (n_a \times n_b)$ međusobnih koeficijenata otpora uzemljivačke mreže i prstena za točku T

$\begin{bmatrix} [i_a] \\ [i_b] \end{bmatrix}$ stupčasta matrica od $(n_a \times n_b) \times 1$ struja elemenata uzemljivačke mreže i prstena

Dodirni napon u točki T koja je na udaljenosti od 1 m od uzemljenog uređaja, određen je razlikom potencijala i iznosi:

$$U_d = V - V_T \tag{4.4–10}$$

gdje je:

V_T potencijal točke T

V potencijal uzemljenog uređaja

Napon koraka dobije se kao razlika potencijala točke T i točke T_1 koja je udaljena 1 m od točke T:

$$U_k = V_T - V_{T1} \tag{4.4–11}$$

gdje je:

V_{T1} potencijal točke T_1

V_T potencijal točke T

Dodirni napon na ogradi spojenoj s metalnim prstenom iznosi:

$$U_{dp} = V_p - V_T \tag{4.4–12}$$

gdje je:

V_p potencijal metalnog prstena

V_T potencijal točke T

4.4.3. Uzemljivač *b* nalazi se na nultom potencijalu

Dodatni je uvjet:

$$u_0 = 0 \tag{4.4–13}$$

Sustav jednadžbi uzemljivača ima, s obzirom na (4.4–1) – (4.4–3), (4.4–5) i (4.4–13), oblik:

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} [1_a]^T & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] & [0] \\ \hline [r_{aa}] & [0] & [0] & [r_{ab}] & [0] & [0] & -[1_a] \\ \hline [r_{ba}] & [0] & [0] & [r_{bb}] & [0] & [0] & [0] \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} [i_a] \\ [i_{ba}] \\ u_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_k \\ [0] \end{bmatrix} \tag{4.4–14}$$

4.4.4. Uzemljivač *b* spojen je s uzemljivačem *a*

Spojeni uzemljivači *a* i *b* mogu se smatrati jednim uzemljivačem i računati po poznatim relacijama, primjerice prema [21], te se dobiva:

$$u_a = u_b = u = \left([1]^T [1]^{-1} [1]^{-1}\right)^{-1} i_k \tag{4.4–15}$$

i

$$\left[\frac{[i_a]}{[i_b]}\right] = [r]^{-1} \cdot [1] u \tag{4.4–16}$$

gdje je:

$$[r] = \left[\frac{[r_{aa}] \quad [r_{ab}]}{[r_{ba}] \quad [r_{bb}]}\right] \tag{4.4–17}$$

$$[1] = \begin{bmatrix} [1_a] \\ [1_b] \end{bmatrix} \tag{4.4–18}$$

4.4.5. Proračun otpora uzemljenja uzemljivača i raspodjele potencijala

Otpor uzemljenja uzemljivača *a* iznosi:

$$R_z = \frac{u_a}{i_k} \tag{4.4–19}$$

Otpor uzemljenja R_z uzima u obzir i utjecaj drugog uzemljivača (npr. metalnih dijelova u tlu).

Kod proučavanja uvjeta za spajanje ili razdvajanje uzemljivača kao i uvjeta bezopasnosti uopće, potreban je proračun razdiobe potencijala na površini tla na karakterističnim pravcima. Potencijal u točki M izračunava se prema relaciji:

$$V_M = [r_{aM}]\cdot[i_a]+[r_{bM}]\cdot[i_b] \qquad (4.4\text{–}20)$$

$[r_{aM}]$ i $[r_{bM}]$ matrice su međusobnih otpornosti točke M i elemenata uzemljivača a odnosno b. Spomenute matrice imaju $1 \times n_a$ i $1 \times n_b$ elemenata.

Način izračunavanja veličina potrebnih za primjenu jednadžbi (4.4–19) i (4.4–20), pokazan je, za razmatrane karakteristične slučajeve, u odsječcima 4.4.3. do 4.4.5. Detaljnija obrada dana je u literaturi [21] iz koje je korišten matrični model proračuna karakteristika sustava uzemljivača.

[L1] Nahman, J: *Zür Berechnung der allgemeinen Kennlinien der Erderlagen in homogen Erdreich*, Publikacija ETF, Beograd, serije Elektroenergetika, br. 48, 1974.

[L2] Nahman, J: *Programi EFD-1 i EFD-2 za proračun uzemljivača u nehomogenom dvoslojnom i homogenom tlu*, XIII Savjetovanje JUNAKO CIGRE, Bled, 1977.

4.5. INTEGRACIJSKO-MATRIČNA METODA

Matrična metoda opisana u poglavlju 4.4. nepraktična je jer sadrži inverziju velike matrice, te ćemo u ovom odsječku razmotriti drugu metodu koja je prikladnija za praksu.

Integracijsko-matrična metoda uspostavlja distribuciju struje duž vodiča uzemljivača, aproksimirajući je sa stepeničastom funkcijom. Ta aproksimacija odgovara ako je gustoća struje konstantna duž elemenata vodiča. Ako nije poznata gustoća struje duž vodiča, metoda će se razvijati njenim računanjem, te ćemo za tu svrhu vodiče uzemljivača podijeliti na određeni broj elemenata. Nadalje ta metoda razvija vezu potencijala u točki s ukupnom strujom koja izbija iz promatranog elementa.

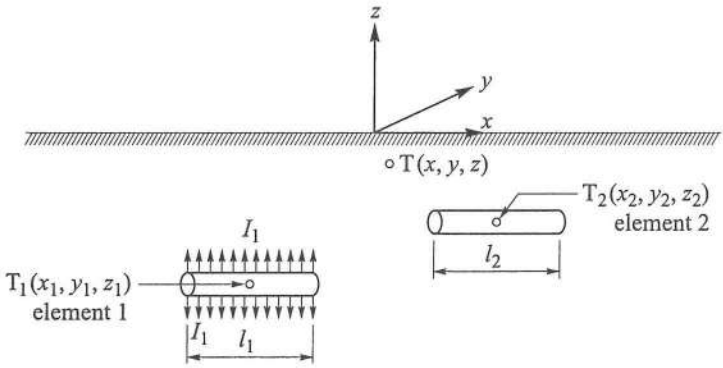
Zatim se upotrebljava matrična metoda kako bi se dobila nepoznata vrijednost električne struje, te je veličina matrice jednaka broju odabranih elemenata. Tako se veličina matrice može zadržati relativno malom. Mora se naglasiti da broj elemenata određuje koliko točno trenutačna distribucija struje određuje stepeničastu funkciju.

Ova metoda dobila je naziv *integracijsko-matrična metoda* zato što obuhvaća integraciju duž konačnog elementa i podsegmentnu aplikaciju matričnom metodom. Vidimo da primjena integracijsko-matrične metode zahtijeva vezu između struje koja se širi s konačne duljine vodiča i napona zadane točke zemlje.

4.5.1. Izračun distribucijskih faktora potencijala *VDF* za međusobni utjecaj dvaju uzemljivača [4]

Na slici 4.5–1 vidimo dva vodljiva elementa l_1 i l_2 položena u zemlju, koji su dio sustava uzemljenja. Koordinate su centra elementa: $T_1(x_1, y_1, z_1)$ i $T_2(x_2, y_2, z_2)$. Pretpostavimo da je I_1 ukupna struja koja se širi iz elementa 1 u zemlju. Također pretpostavimo da je tok struje iz površine elementa konstantne gustoće. Treba naći:

- potencijal točke T(x, y, z) u zemlji u smjeru toka struje I_1 iz elementa 1
- potencijal koji se prenosi na element 2 zbog toka struje iz elementa 1
- potencijal elementa 1 u smjeru toka struje I_1 u elementu 1



Sl. 4.5–1. Sustav uzemljenja s dva vodljiva elementa l_1 i l_2 za izračun distribucijskih faktora potencijala *VDF* u točki T.

Potencijal u bilo kojoj točki T(x, y, z) ili potencijal drugog vodiča ili pak vodiča iz kojeg teče struja I, proporcionalan je toj struji I:

$$V = R_T \cdot I \tag{4.5–1}$$

Otpor R_T ovisi o geometriji sustava i o specifičnom otporu tla ρ_z. Prepoznajući da je R_T distribucijski faktor potencijala *VDF*, formula (4.5–1) prelazi u oblik:

$$V = VDF \cdot I \tag{4.5–2}$$

Zbog velikog broja geometrija sustava, ograničit ćemo se samo na vodič orijentiran u smjeru koordinatnih osi x, y i z. U tablici 4.5–1 dani su faktori *VDF* za ta tri smjera. Oni služe za izračunavanje potencijala točke T(x, y, z), koji je generiran od struje I_1 u elementu 1. x_1, y_1, z_1 su koordinate središta elementa 1, a

$$F_1(t,u) = \ln\left(t + \sqrt{t^2 + u^2}\right) \qquad A_x^{\pm} = \sqrt{(y - y_1)^2 + (z \pm z_1)^2}$$

$$A_y^{\pm} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (z \pm z_1)^2} \qquad A_z^{-} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y \pm y_1)^2} \tag{4.5–3}$$

Za izračunavanje potencijala koji se prenosi na element 2 zbog toka struje I_1 iz elementa 1 u zemlju, služe faktori *VDF* u tablici 4.5–2 u smjerovima $x - x, y - y, z - z$ od segmenta 1 ka segmentu 2.

Tablica 4.5–1. Distribucijski faktori potencijala *VDF* između elementa 1 orijentiranog u smjeru osi x i točke T(x, y, z).

u smjeru x	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\left[F_1\left(x-x_1+\frac{l_1}{2}, A_x^-\right)-F_1\left(x-x_1-\frac{l_1}{2}, A_x^-\right)+ +F_1\left(x-x_1+\frac{l_1}{2}, A_x^+\right)-F_1\left(x-x_1-\frac{l_1}{2}, A_x^-\right)\right]$
u smjeru y	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\left[F_1\left(y-y_1+\frac{l_1}{2}, A_y^-\right)-F_1\left(y-y_1-\frac{l_1}{2}, A_y^-\right)+ +F_1\left(y-y_1+\frac{l_1}{2}, A_y^+\right)-F_1\left(y-y_1-\frac{l_1}{2}, A_y^-\right)\right]$
u smjeru z	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\left[F_1\left(z-z_1+\frac{l_1}{2}, A_z^-\right)-F_1\left(z-z_1-\frac{l_1}{2}, A_z^-\right)+ +F_1\left(z-z_1+\frac{l_1}{2}, A_z^+\right)-F_1\left(z-z_1-\frac{l_1}{2}, A_z^-\right)\right]$

Tablica 4.5–2. Distribucijski faktori *VDF* za element 2.

u smjeru $x-x$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\left[F_2\left(x_2-x_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_x^-\right)-F_2\left(x_2-x_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_x^-\right)- -F_2\left(x_2-x_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_x^-\right)+F_2\left(x_2-x_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_x^-\right)+ +F_2\left(x_2-x_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_x^+\right)-F_2\left(x_2-x_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_x^+\right)- -F_2\left(x_2-x_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_x^+\right)+F_2\left(x_2-x_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_x^+\right)\right]$
u smjeru $y-y$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\left[F_2\left(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_y^-\right)-F_2\left(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_y^-\right)- -F_2\left(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_y^-\right)+F_2\left(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_y^-\right)+ +F_2\left(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_y^+\right)-F_2\left(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_y^+\right)- -F_2\left(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2}, B_y^+\right)+F_2\left(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2}, B_y^+\right)\right]$

Tablica 4.5–2. – nastavak.

u smjeru $z-z$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\Big[F_2\Big(z_2-z_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2},B_z^-\Big)-F_2\Big(z_2-z_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2},B_z^-\Big)-$ $-F_2\Big(z_2-z_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2},B_z^-\Big)+F_2\Big(z_2-z_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2},B_z^-\Big)+$ $+F_2\Big(z_2-z_1+\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2},B_z^+\Big)-F_2\Big(z_2-z_1+\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2},B_z^+\Big)-$ $-F_2\Big(z_2-z_1-\frac{l_1}{2}+\frac{l_2}{2},B_z^+\Big)+F_2\Big(z_2-z_1-\frac{l_1}{2}-\frac{l_2}{2},B_z^+\Big)\Big]$
u smjeru $x-y$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\Big[F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},y_2-y_1+\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},y_2-y_1+\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},y_2-y_1+\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},y_2-y_1-\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},y_2-y_1+\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},y_2-y_1-\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},y_2-y_1+\frac{l_2}{2},z_2-z_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},y_2-y_1-\frac{l_2}{2},z_2+z_1\Big)\Big]$
u smjeru $x-z$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\Big[F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},z_2-z_1+\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},z_2-z_1+\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},z_2-z_1+\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},z_2-z_1-\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},z_2-z_1+\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1+\frac{l_1}{2},z_2+z_1-\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)-$ $-F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},z_2-z_1+\frac{l_2}{2},y_2-y_1\Big)+$ $+F_3\Big(x_2-x_1-\frac{l_1}{2},z_2-z_1-\frac{l_2}{2},y_2+y_1\Big)\Big]$

Tablica 4.5–2. – nastavak.

u smjeru $x-z$	$\frac{\rho_z}{4l_1l_2\pi}\Big[F_3\Big(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)-$ $-F_3\Big(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)-$ $-F_3\Big(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)+$ $+F_3\Big(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}, z_2-z_1-\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)+$ $+F_3\Big(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)-$ $-F_3\Big(y_2-y_1+\frac{l_1}{2}, z_2+z_1-\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)-$ $-F_3\Big(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2-x_1\Big)+$ $+F_3\Big(y_2-y_1-\frac{l_1}{2}, z_2-z_1+\frac{l_2}{2}, x_2+x_1\Big)\Big]$

x_2, y_2 i z_2 koordinate su središta elementa 2, a

$$B_x^{\pm}=\sqrt{(y_2-y_1)^2+(z_2\pm z_1)^2}, \qquad B_y^{\pm}=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(z_2\pm z_1)^2}$$

$$B_z^{\pm}=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2\pm y_1)^2}$$

U tablici 4.5–3 dani su distribucijski faktori *VDF* za izračunavanje potencijala na elementu 1 zbog odvoda struje I_1 iz elementa 1.

Tablica 4.5–3. Distribucijski faktori *VDF* za element 1.

u smjeru x	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\big[F_2(l_1,a)+F_2(-l_1,a)-2a+F_2(l_1,\lvert z_1\rvert\sqrt{2})+$ $+F_2(-l_1,\lvert z_1\rvert\sqrt{2})-2\lvert z_1\rvert\sqrt{2}\big]$
u smjeru y	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\big[F_2(l_1,a)+F_2(-l_1,a)-2a+F_2(l_1,\lvert z_1\rvert\sqrt{2})+$ $+F_2(-l_1,\lvert z_1\rvert\sqrt{2})-2\lvert z_1\rvert\sqrt{2}\big]$
u smjeru z	$\frac{\rho_z}{4l_1\pi}\big[F_2(l_1,a)+F_2(-l_1,a)-2a+F_2(2\lvert z_1\rvert+l_1,a)+$ $+F_2(2\lvert z_1\rvert-l_1,a)-2F_2(\lvert z_1\rvert,a)\big]$

Funkcija F_2 definirana je izrazom:

$$F_2(t,u) = t\ln\left[\sqrt{t+\left(t^2+u^2\right)}\right] = \sqrt{t^2+u^2} \tag{4.5–4}$$

4.5.2. Izračun potencijala za *n* paralelnih uspravnih uzemljivača

Promatramo bilo koju točku T(x, y, z) u zemlji u neposrednoj blizini uzemljivača (element 1) kojim u zemlju teče struja I_1, slika 4.5–2. Treba izračunati potencijal točke T. Pretpostavljamo da je struja I_1 uniformno raspodijeljena po površini elementa, te se može uzeti da je izvor struje linijski, smješten u osi elementa, linijske gustoće struje I_1/l_1. Struja za malu dužinu $\mathrm{d}x_s$ je:

$$I_1\frac{\mathrm{d}x_s}{l_1}$$

Doprinos ove struje potencijalu u točki T(x, y, z) iznosi:

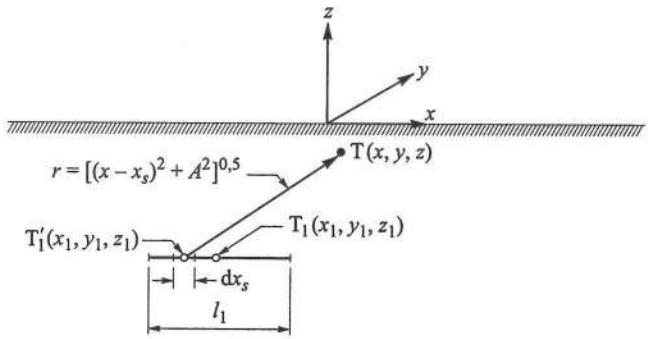
$$\mathrm{d}V(x,y,z) = \frac{I_1\mathrm{d}x_s\rho_z}{4l_1\pi}\left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_s)^2+A_-^2}+\sqrt{(x-x_s)^2+A_+^2}}\right] \tag{4.5–5}$$

gdje je:

$$A_\pm^2 = (y-y_1)^2+(z\pm z_1)^2$$

Potencijal u točki T(x, y, z) dobiven od beskonačno malog strujnog izvora je:

$$V(x,y,z) = \int \mathrm{d}V(x,y,z) = \frac{I_1\rho_z}{4\pi l_1}\int_{x_s=x_1-\frac{l_1}{2}}^{x_1+\frac{l_1}{2}}\left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_s)^2+A_-^2}+\sqrt{(x-x_s)^2+A_+^2}}\right]\mathrm{d}x_s$$



Sl. 4.5–2. Uzemljivač duljine l_1 kojim teče struja I_1 nalazi se na udaljenosti r od točkastog izvora T. Izračun distribucijskog faktora potencijala *VDF* u točki T.

Gornji se integral rješava uz pomoć sljedećeg neodređenog integrala:

$$\int \frac{1}{\sqrt{t^2 \pm u^2}} \mathrm{d}t = \ln\left(t + \sqrt{t^2 \pm u^2}\right)$$

te je rezultat:

$$V(x,y,z) = \frac{I_1 \rho_z}{4 l_1 \pi}\left[F_1\left(x - x_1 + \frac{l_1}{2}, A_-\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l_1}{2}, A_-\right) + \right.$$
$$\left. + F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, A_+\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, A_+\right)\right] \tag{4.5–6}$$

gdje je:

$$F_1(t,u) = \ln\left(t + \sqrt{t^2 + u^2}\right)$$
$$A_\pm = (y - y_1) + (z \pm z_1)$$

Tako dobivamo formulu kojom se definiraju distribucijski faktori potencijala između uzemljivača duljine l orijentiranog paralelno s x-osi i točke T(x, y, z):

$$VDF = \frac{\rho_z}{4 l_1 \pi}\left[F_1\left(x - x_1 + \frac{l_1}{2}, A_-\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l_1}{2}, A_-\right) + \right.$$
$$\left. + F_1\left(x - x_1 + \frac{l_1}{2}, A_+\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l_1}{2}, A_+\right)\right] \tag{4.5–7}$$

Promatrajmo sliku 4.5–1. Kroz element 1 teče struja I_1 stvarajući na elementu 1 potencijal V_1 koji se prenosi na element 2, te je na tom elementu potencijal V_2. Naš je zadatak da izračunamo potencijal elementa 2. Taj potencijal izračunat ćemo tako da izračunamo srednju vrijednost potencijala duž središnje linije elementa 2. Pritom se x mijenja u intervalu:

$$\left[x_2 - \frac{l_2}{2} \le x \le x_2 + \frac{l_2}{2}\right]$$

Potencijal točke $T_2(x_2, y_2, z_2)$ iznosi:

$$V_2(x_2,y_2,z_2) = \frac{I_1 \rho_z}{4 l_1 \pi}\left[F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, B_-\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, B_-\right) + \right.$$
$$\left. + F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, B_+\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, B_+\right)\right] \tag{4.5–8}$$

gdje je:

$$B_{\pm} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (z_2 \pm z_1)^2}$$

Srednja vrijednost potencijala osi elementa 2 iznosi:

$$V_2 = \frac{1}{l_2} \int_{x_s = x_2 - \frac{l_2}{2}}^{x_2 + \frac{l_2}{2}} V_2(x, y, z)\,\mathrm{d}x \tag{4.5–9}$$

Integral (4.5–9) izračunavamo uz pomoć sljedećega neodređenog integrala:

$$\int F_1(t,u)\mathrm{d}t = t \ln \sqrt{t + t^2 + u^2} - \sqrt{t^2 + u^2}$$

te je rezultat:

$$\begin{aligned} V_2 = \frac{I_1 \rho_z}{4 l_1 l_2 \pi} \Bigg[& F_2\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2}, B_-\right) + F_2\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2}, B_+\right) - \\ & - F_2\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{2}, B_-\right) - F_2\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{2}, B_+\right) - \\ & - F_2\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2}, B_-\right) - F_2\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2} + \frac{l_2}{2}, B_+\right) + \\ & + F_2\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{2}, B_-\right) + F_2\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2} - \frac{l_2}{2}, B_+\right) \Bigg] \end{aligned} \tag{4.5–10}$$

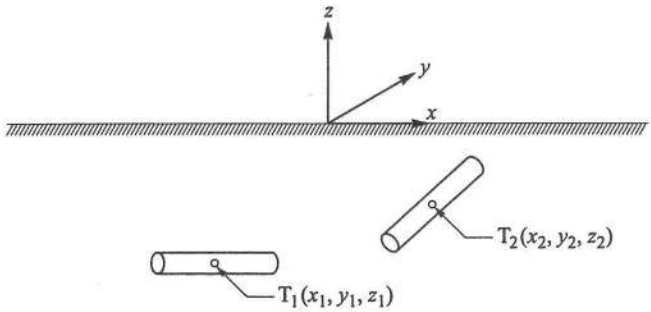
gdje je:

$$F_2(t,u) = t \ln \sqrt{t + t^2 + u^2} - \sqrt{t^2 + u^2} \tag{4.5–11}$$

Izraz u srednjoj zagradi formule (4.5–10) distribucijski je faktor potencijala *VDF*, te formula (4.5–10) poprima oblik:

$$V_2 = \frac{I_1 \rho_z}{4 \pi l_1 l_2} VDF \tag{4.5–12}$$

Promatrajmo, slika 4.5–3, dva uspravna uzemljivača, jedan postavljen u smjeru x-osi, a drugi u smjeru y-osi. Neka je element 1 duljine l_1 s točkom u središtu $T_1(x_1, y_1, z_1)$ i element 2 duljine l_2 s točkom u središtu $T_2(x_2, y_2, z_2)$. Kroz x–orijentirani element teče struja I_1. Naš je cilj da izračunamo potencijal prenesen na y–orijentirani element, koji ćemo izračunati tako da izračunamo srednji potencijal duž njezine središnje linije. Pri tome se y mijenja u intervalu



Sl. 4.5–3. Dva uspravna uzemljivača postavljeni, jedan u smjeru x-osi, a drugi u smjeru y-osi.

$$\left[y_2 - \frac{l_2}{2} \le y \le y_2 + \frac{l_2}{2}\right]$$

Potencijal u točki $T_2(x_2, y_2, z_2)$, koji je nastao zbog struje I_1 u elementu 1, računa se upotrebom formule (4.5–7):

$$V_2(x_2, y_2, z_2) = \frac{I_1 \rho_z}{4 l_1 l_2 \pi}\left[F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, C_-\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, C_-\right) + \right.$$
$$\left. + F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, C_+\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, C_+\right)\right] \tag{4.5–13}$$

gdje je:

$$C_\pm = \sqrt{(y - y_1)^2 + (z_2 \pm z_1)^2}$$

Potencijal y–orijentiranog elementa računamo kao srednji potencijal $V_2(x_2, y, z_2)$ duž središnje linije:

$$V_2 = \frac{1}{l_2} \int_{y = y_2 - \frac{l_2}{2}}^{y_2 + \frac{l_2}{2}} V_2(x_2, y, z_2)\,\mathrm{d}y \tag{4.5–14}$$

Gornji integral računamo uz pomoć sljedećeg neodređenog integrala:

$$F_3(t, u, v)\mathrm{d}t = \int \ln\sqrt{t + (t^2 + u^2 + v^2)}\,\mathrm{d}u =$$
$$= -u + u\ln\left[t + \sqrt{t^2 + u^2 + v^2}\right] + t\ln\left[u + \sqrt{t^2 + u^2 + v^2}\right] +$$
$$+ 2v\frac{t + u + \sqrt{t^2 + u^2 + v^2}}{\tan v}$$

Primjenjujući gornji integral na zbroj četiriju dijelova formule (4.5–14) dobivamo:

$$
\begin{aligned}
V_2 = \frac{I_1 \rho_z}{4 l_1 l_2 \pi} \Bigg[& F_3\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 + \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) - \\
& - F_3\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 + \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) - \\
& - F_3\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 + \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) + \\
& + F_3\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 - \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) + \\
& + F_3\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 + \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) - \\
& - F_3\left(x_2 - x_1 + \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 - \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) - \\
& - F_3\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 + \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) + \\
& + F_3\left(x_2 - x_1 - \frac{l_1}{2}, y_2 - y_1 - \frac{l_2}{2}, z_2 - z_1\right) \Bigg]
\end{aligned}
\tag{4.5–15}
$$

Distribucijski faktor potencijala *VDF* dobije se upotrebom formule:

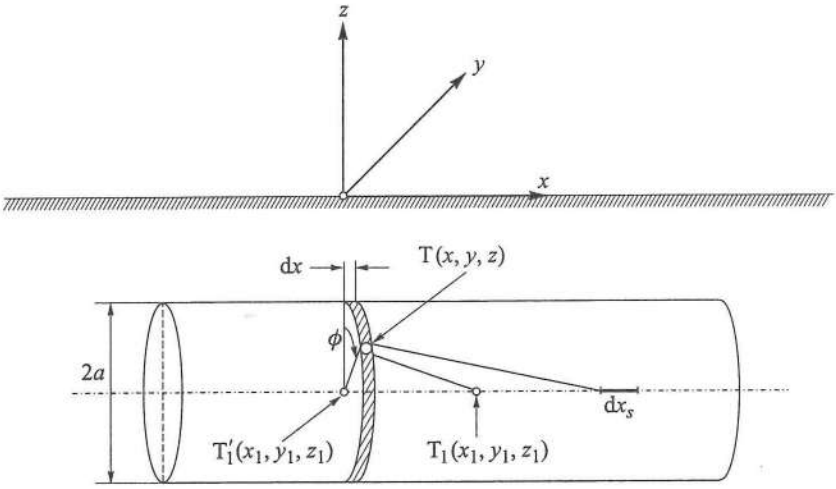
$$
VDF = \frac{V_2}{I_1} \tag{4.5–16}
$$

4.5.3. Izračunavanje distribucijskog faktora potencijala *VDF* za trakasti uzemljivač

Promatramo usamljen uzemljivač položen u zemlju, duljine l i polumjera a. Njime teče struja I, kako je to prikazano na slici 4.5–4. Gustoća je struje duž uzemljivača konstantna.

Potencijal uzemljivača računa se kao srednji potencijal cilindrične površine uzemljivača. Kako je duljina uzemljivača mnogo veća od polumjera, $l \gg a$, dvije se završne površine uzemljivača zanemaruju.

Beskonačno mala duljina elementa dx_s linijskog izvora struje predstavlja beskonačno mali linijski izvor struje $I\, dx_d/l$, te je potencijal tog malog izvora struje:



Sl. 4.5–4. Usamljeni uzemljivač duljine l polumjera a kojim teče struja I.

$$\mathrm{d}V(x,y,z) = \frac{I\rho_z \mathrm{d}x_s}{4\pi l}\left[\frac{1}{\sqrt{(x_s - x)^2 + a^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x_s - x)^2 + A_+^2}}\right] \tag{4.5–17}$$

gdje je:

$$A_+ = \sqrt{(y - y_1)^2 + (z + z_1)^2}$$

Još se pretpostavlja da je dubina ukopa uzemljivača mnogo veća od polumjera, $h >> a$, te se koeficijent A_+ aproksimira s:

$$A_+ = \sqrt{2z_1^2}$$

Potencijal u točki T(x, y, z) jednak je zbroju doprinosa svih beskonačno malih izvora:

$$V(x,y,z) = \int_{x=x_1-\frac{l}{2}}^{x_1+\frac{l}{2}} \mathrm{d}V(x,y,z)$$

Nakon uvrštenja A_+ i izračunavanja integrala dobije se:

$$V(x,y,z) = \frac{I\rho_z}{4l\pi}\left[F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, a\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, a\right) + \right.$$
$$\left. + F_1\left(x - x_1 + \frac{l}{2}, (z_1)\sqrt{2}\right) - F_1\left(x - x_1 - \frac{l}{2}, (z_1)\sqrt{2}\right)\right] \tag{4.5–18}$$

Potencijal uzemljivača računamo kao srednji potencijal duž površine uzemljivača. Budući da je $V(x, y, z) = V(x)$, slijedi:

$$V_1 = \frac{1}{l} \int_{x=x_1-\frac{l}{2}}^{x_1+\frac{l}{2}} V(x)\mathrm{d}x \tag{4.5–19}$$

Nakon izračunavanja integrala dobije se:

$$V_1 = \frac{I\rho_z}{4\pi l^2}\Big[F_2(l,a) - F_2(0,a) - F_2(0,a) + F_2(-l,a) + F_2\big(l,(z_1)\sqrt{2}\big) - \\ -F_2\big(0,(z_1)\sqrt{2}\big) - F_2\big(0,(z_1)\sqrt{2}\big) + F_2\big(-l,(z_1)\sqrt{2}\big)\Big] \tag{4.5–20}$$

Funkcija F_2 definirana je jednadžbom (4.5–11). Primijetimo da je:

$$F_2(0,a) = -a$$

i

$$F_2(0,|z_1|\sqrt{2}) = -a$$

te je

$$V_1 = \frac{I\rho_z}{4\pi l^2}\Big[F_2(l,a) - F_2(-l,a) - 2a + F_2\big(l,(z_1)\sqrt{2}\big) + \\ +F_2\big(-l,(z_1)\sqrt{2}\big) - 2(z_1)\sqrt{2}(\ )\Big] \tag{4.5–21}$$

Distribucijski faktor potencijala iznosi:

$$VDF = \frac{V_1}{I} \tag{4.5–22}$$

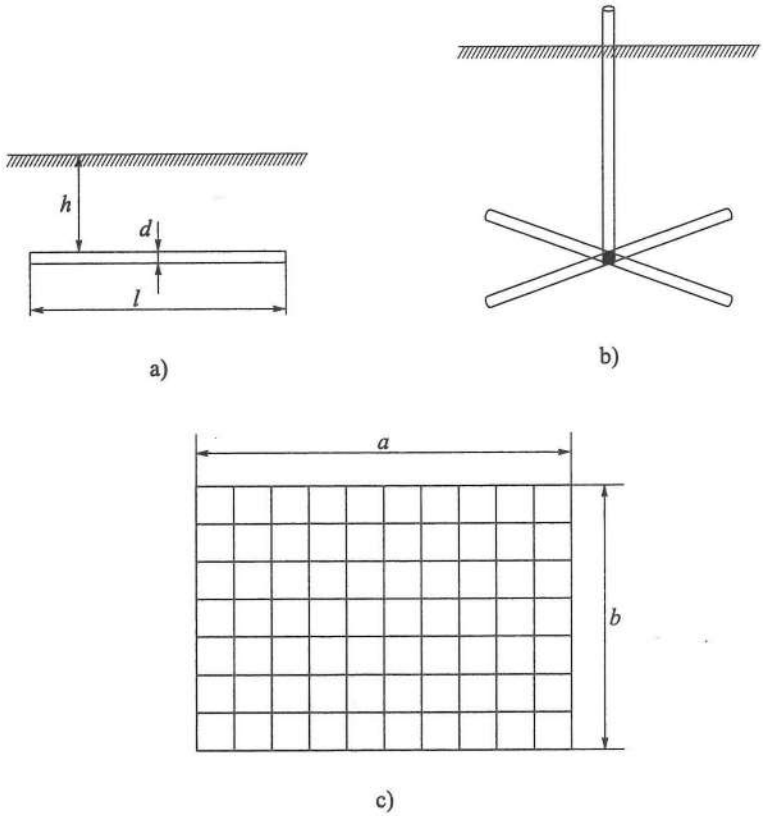
4.6. IZRAČUN OTPORA UZEMLJENJA NEKIH UZEMLJIVAČA S POMOĆU DISTRIBUCIJSKIH FAKTORA POTENCIJALA (*VDF*)

Na slici 4.6–1 predstavljeni su trakasti a), zvjezdasti b) i mrežasti c) uzemljivač.

Analiza se može izvesti na dva istovrijedna načina. Prvi je način da se pretpostavi da određena struja teče kroz uzemljivač u zemlju, te se izračuna razdioba potencijala. Drugi je način da se pretpostavi da je određeni napon u odabranoj točki uzemljivača, te se izračuna razdioba potencijala i struja koja teče u zemlju i u zemlji.

U analizi sustava uzemljenja može se zanemariti pad napona na vodičima sustava uzemljenja, tako da je sustav uzemljenja na istom potencijalu kao i okolno tlo. Ta

je pretpostavka realna imajući u vidu relativno velike presjeke i dobru vodljivost vodiča uzemljivača.



Sl. 4.6–1. Tipovi uzemljivača: a) trakasti, b) zvjezdasti, c) mrežasti.

4.6.1. Trakasti uzemljivač

Trakasti uzemljivač podijelimo na elemente iz kojih struja teče u zemlju. Pretpostavimo da iz i-tog elementa teče u zemlju struja I_i. Korištenjem tablica 4.5–2 i 4.5–3 uspostavit ćemo vezu između napona i-tog elementa V_i i struje i-tog elementa korištenjem distribucijskih faktora potencijala VDF, tj. napon V_i i-tog elementa bit će ostvaren doprinosom struja svih ostalih elemenata.

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} (VDF)_{ij} I_j \tag{4.6–1}$$

$(VDF)_{ij}$ je distribucijski faktor potencijala između elemenata i i j.

U stvarnosti napon svih elemenata uzemljivača približno je isti $V_i = V$, te je:

$$V = \sum_{j=1}^{n}(VDF)_{ij} I_i, \qquad V = \sum_{j=1}^{n}(VDF)_{ij} I_j \quad \ldots \quad V = \sum_{j=1}^{n}(VDF)_{nj} I_j \tag{4.6–2}$$

Taj sustav dovodi u vezu napon na uzemljivaču s tokom struje u zemlju, te jednom kada se izračuna struja, mogu se izračunati i druge osobine od interesa, kao što je to otpor uzemljenja uzemljivača:

$$R_z = \frac{V}{I_1 + I_2 + \ldots + I_n} \tag{4.6–3}$$

Potencijal u bilo kojoj točki oko uzemljivača (npr. točke A) može se izračunati s pomoću tablice 4.5–1:

$$V_A = \sum_{j=1}^{n}(VDF)_{Aj} I_j \tag{4.6–4}$$

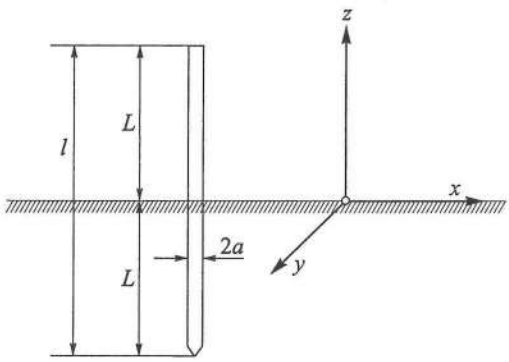
VDF_{Aj} naponski je distribucijski faktor između elementa j i točke A

4.6.2. Štapni uzemljivač

Razmotrimo štapni uzemljivač prikazan na slici 4.6–2 s pretpostavljenim realnim uvjetima:

– duljina uzemljivača l mnogo je veća od polumjera a, $l \gg a$,

– uzemljivač je ukopan u zemlju uspravno na dubinu L, tako da je $L = l/2$.



Sl. 4.6–2. Štapni uzemljivač duljine l i polumjera a ukopan u dubinu L.

S pomoću distribucijskih faktora potencijala VDF u tablici 4.5–3 u smjeru osi z, te stavljanjem $z_1 = L$ i $l = 2L$ dobije se:

$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left[F_2(2L,a) - F_2(-2L,a) - 2a + F_2(4L,a) - \right.$$
$$\left. -a - 2F_2(2L,a)\right] \tag{4.6–5}$$
$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left[F_2(4L,a) - F_2(2L,a) + F_2(-2L,a) - 3a\right]$$

Nakon uvođenja funkcije F_2 (4.5–4) dobije se:

$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left\{4L\ln\left[4L + \sqrt{(4L)^2 + a^2} - \sqrt{(4L)^2 + a^2}\right] - \right.$$
$$\left. -2L\ln\left[2L\sqrt{(2L)^2 + a^2}\right] - 2L\ln\left[-2L + \sqrt{(2L)^2 + a^2} - 3a\right]\right\} \tag{4.6–6}$$

Uvrštenjem aproksimacija:

$$4L + \sqrt{(4L)^2 + a^2} \approx 8L + \frac{a^2}{8L} \approx 8L, \qquad 2L + \sqrt{(2L)^2 + a^2} \approx 4L + \frac{a^2}{4L} \approx 4L,$$
$$-2L + \sqrt{(2L)^2 + a^2} \approx \frac{a^2}{4L}, \qquad \sqrt{(4L)^2 + a^2} \approx 4L + \frac{a^2}{8L} \approx 4L \tag{4.6–7}$$

u (4.6–6) dobije se:

$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left(4L\ln 8L - 4L - 2L\ln 4L - 2L\ln\frac{a^2}{4L} - 3a\right)$$
$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left[2L\ln\frac{8L}{4L} - 4L - 3a + 2L\ln\frac{8L\cdot 4L}{a^2}\right] \tag{4.6–8}$$
$$R_z = \frac{\rho_z}{16L^2\pi}\left[(4L\ln 2 - 4L - 3a) + 4L\ln\frac{2\cdot 2L}{a}\right]$$

Veličina $4L\ln 2 - 4L - 3a$ veoma je mala u usporedbi s $4L\ln(4L/a)$, te ako se zanemari dobije se:

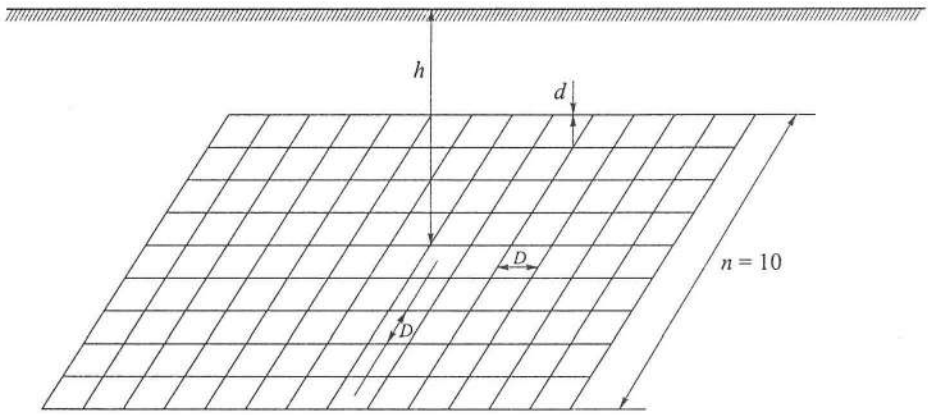
$$R_z = \frac{\rho_z}{4L\pi}\ln\frac{4L}{a} \tag{4.6–9}$$

U praksi sondu zabijamo za duljinu l, te je $l = 2L$, i obično računamo s vanjskim promjerom sonde d umjesto s polumjerom a, pa je $d = 2a$, i uvrštavanjem tog u formulu (4.6–9) dobivamo formulu za izračun otpora uzemljenja štapnog uzemljivača:

$$R_z = \frac{\rho_z}{4\frac{l}{2}\pi} \ln \frac{4\frac{l}{2}}{\frac{d}{2}} = \frac{\rho_z}{2l\pi} \ln \frac{4l}{d} \qquad (4.6\text{–}10)$$

4.6.3. Mrežasti uzemljivač

Mrežasti uzemljivač prikazan je na slici 4.6–3. Sastoji se od mrežastih vodiča na udaljenosti D. Udaljenost D obično je od 1,5 do 6 m. Ukopan je u zemlju od 0,3 do 1,5 m, kako je to često u praksi. Po konstrukciji mrežasti je uzemljivač sličan uzemljivaču oblika ploče koja je ukopana na mnogo manju dubinu od njezinih dimenzija.



Sl. 4.6–3. Mrežasti uzemljivač ukopan u dubinu h, udaljenost je između mrežastih vodiča D, a promjer je vodiča d.

Otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača R_{zm} oblika kvadrata ili pravokutnika u prvom približenju jednak je otporu uzemljenja pločastog uzemljivača R_{zp} iste površine i dubine ukopa s polumjerom r te je:

$$R_{zp} = \frac{\rho_z}{4r} \qquad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \qquad R_{zm} = R_{zp} = \frac{\rho_z}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} \qquad (4.6\text{–}11)$$

A je površina mrežastog uzemljivača. U 10. poglavlju dane su formule za točniji izračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača.

Za izračun dodirnog napona U_d i napona koraka U_k promatramo kvadratični mrežasti uzemljivač s empirijskim formulama:

$$U_k = \frac{\rho_z K_s K_i I_z}{L} \qquad U_d = \frac{\rho_z K_m K_i I_z}{L} \qquad (4.6\text{–}14)$$

gdje je:

I_z ukupna struja koja teče s mrežastog uzemljivača u tlo

L ukupna duljina vodiča mrežastog uzemljivača

K_i faktor koji uzima u obzir da razdioba struje nije uniformna duž mrežastog uzemljivača, prema Kochu [4] iznosi 0,65 + 0,172n

$\left.\begin{matrix} K_m \\ K_s \end{matrix}\right\}$ geometrijski faktori

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi}\ln\left(\prod_{j=1}^{n}\frac{2i-3}{2i-2}\right)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{h} + \frac{1}{D+h} + \sum_{i=3}^{n}\frac{1}{(i-1)D}\right] \tag{4.6–13}$$

gdje je:

n broj paralelnih vodiča uzemljivača

D razmak između dvaju susjednih vodiča uzemljivača

d promjer vodiča uzemljivača

h dubine ukopa uzemljivača (m).

4.7. MEĐUSOBNI OTPORI UZEMLJENJA ZA USPOREDNO I USPRAVNO POSTAVLJANJE UZEMLJIVAČA [75]

Osnovu proračuna složenih uzemljivača čini analogija između stacionarnoga električnog polja u vodljivoj sredini i elektrostatičkog polja u dielektriku. Ta analogija omogućava da se za proračun složenih uzemljenja upotrijebi sustav Makswellovih jednadžbi [L1]:

$$V_k = \sum_{i=1}^{n}(VDF)_{ki} \cdot I_i \tag{4.7–1}$$

Na taj se način zadatak proračuna složenih uzemljivača svodi na određivanje vlastitih i međusobnih distribucijskih faktora potencijala $(VDF)_{ki}$ i raspodjele struje po pojedinim elementima uzemljivača I_i.

Elektrostatička analogija omogućava da se izračunaju vlastite i međusobne otpornosti za različite oblike jednostavnih odsječaka iz kojih se sastoje složeni uzemljivači. Pritom se najčešće upotrebljava metoda srednjeg potencijala [L1] koja daje veoma točne rezultate za tanke pravolinijske vodiče od kojih su većinom i sastavljeni složeni i mrežasti uzemljivači. Da bi primjena te metode dala što točnije rezultate, promatrani složeni uzemljivač dijeli se na veći broj odsječaka. Ako je broj tih odsječaka veći, tj. ako su odsječci manjih dimenzija, to je proračun točniji, ali je i obimniji.

Za točniji proračun izmjere odsječaka na koje se dijeli složeni uzemljivač trebaju biti dovoljno male, tako da su ispunjene sljedeće pretpostavke:

- struja pojedinog odsječka ravnomjerno je raspodijeljena po njegovoj duljini i jednaka je srednjoj struji tog odsječka
- potencijal je ravnomjerno raspodijeljen duž promatranog odsječka.

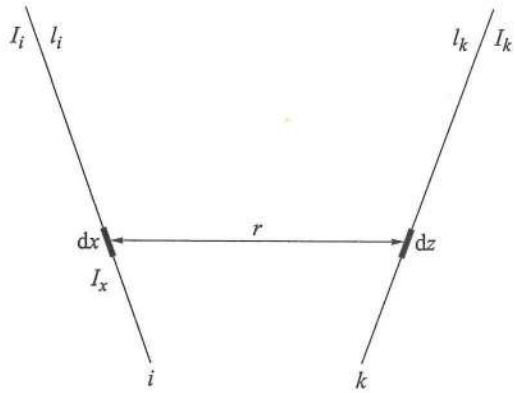
4.7.1. Opća teorija

Uzmimo dva linijska vodiča i i k, duljine l_i i l_k, s kojih otječu struje I_i i I_k, slika 4.7–1. Budući da se pretpostavlja da je struja odsječka ravnomjerno raspodijeljena po njegovoj duljini, vrijedi:

$$I_x = \frac{I_i}{l_i} \tag{4.7–2}$$

Potencijal koji u vodljivoj sredini specifične otpornosti ρ_z stvara struja I_x elementa dx vodiča i na mjestu elementa dz vodiča k može se izraziti kao:

$$V_{zx} = \frac{\rho_z \cdot I_x}{4\pi r} = \frac{\rho_z I_i}{4\pi r I_i} \tag{4.7–3}$$



Sl. 4.7–1. Dva linijska vodiča.

Struja koja otječe s vodiča i stvara na mjestu elementa dz vodiča k potencijal:

$$V_{zi} = \int_0^{l_i} V_{zx} \mathrm{d}x = \frac{\rho_z I_i}{4\pi l_i} \int_0^{l_i} \frac{\mathrm{d}x}{r} \tag{4.7–4}$$

Međusobna otpornost elementa dz i vodiča i definira se kao distribucijski faktor potencijala:

$$(VDF)_{zi} = \frac{V_{zi}}{I_i} = \frac{\rho_z}{4\pi l_i}\int_0^{l_i}\frac{\mathrm{d}x}{r} \tag{4.7–5}$$

Potencijal koji struja vodiča i stvara na vodiču k iznosi:

$$V_{ki} = \frac{1}{l_k}\int_0^{l_k} V_{zi}\mathrm{d}z = \frac{\rho_z I_i}{4\pi l_i l_k}\int_0^{l_i}\int_0^{l_k}\frac{\mathrm{d}x\cdot\mathrm{d}z}{r} \tag{4.7–6}$$

Iz te formule slijedi međusobna otpornost dvaju pravolinijskih vodiča i i k, a time i distribucijski faktor potencijala:

$$(VDF)_{ki} = \frac{V_{ki}}{l_i} = \frac{\rho_z I_i}{4\pi l_i l_k}\int_0^{l_i}\int_0^{l_k}\frac{\mathrm{d}x\cdot\mathrm{d}z}{r} \tag{4.7–7}$$

Vidi se da je za određivanje distribucijskih faktora potencijala VDF_{ki} dvaju linijskih vodiča uzemljivača potrebno riješiti dvostruki integral, koji je dosta složen, te je potrebno upotrijebiti računalo.

4.7.2. Međusobni otpori uzemljenja za usporedno postavljanje uzemljivača

a) Usporedni uzemljivači u ravnini

Upotrebom formule (4.7–4) može se izračunati potencijal koji struja elementa b stvara u točki A elementa a:

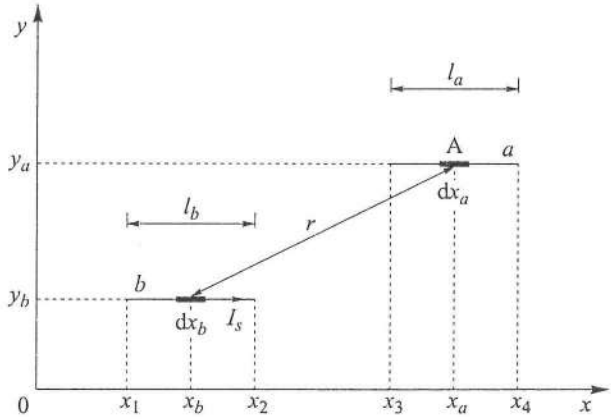
$$V_A = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)}\int_{x_1}^{x_2}\frac{\mathrm{d}x_b}{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi l_b}\cdot B \tag{4.7–8}$$

gdje je:

$$B = \int_{x_1}^{x_2}\frac{\mathrm{d}x_b}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \tag{4.7–9}$$

Zamjenom $x_a - x_b = t$ i uporabom [L5] dobije se:

$$B = -\operatorname{ar\,sh}\frac{x_a - x_2}{y_a - y_b} + \operatorname{ar\,sh}\frac{x_a - x_1}{y_a - y_b} \tag{4.7–10}$$



Sl. 4.7–2. Izračunavanje međusobne otpornosti elemenata *a* i *b*.

Potencijal koji struja elementa *b* stvara na elementu *a* dobiva se iz (4.7–6), (4.7–8) i (4.7–10):

$$V_{ab} = \frac{1}{x_4 - x_3} \int_{x_3}^{x_4} V_A \mathrm{d}x_a$$

tj.

$$V_{ab} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)(x_4 - x_3)} \int_{x_3}^{x_4} \left(-\mathrm{arsh}\frac{x_a - x_2}{y_a - y_b} + \mathrm{arsh}\frac{x_a - x_1}{y_a - y_b} \right) \mathrm{d}x_a \tag{4.7–11}$$

Međusobna otpornost elemenata *a* i *b* definirana kao distribucijski faktor potencijala:

$$V_{ab} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)(x_4 - x_3)} \int_{x_3}^{x_4} \left(-\mathrm{arsh}\frac{x_a - x_2}{y_a - y_b} + \mathrm{arsh}\frac{x_a - x_1}{y_a - y_b} \right) \mathrm{d}x_a$$

$$V_{ab} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)(x_4 - x_3)} \cdot C \tag{4.7–12}$$

gdje je

$$C = \int_{x_3}^{x_4} \left(-\mathrm{ar\,sh}\frac{x_a - x_2}{y_a - y_b} + \mathrm{ar\,sh}\frac{x_a - x_1}{y_a - y_b} \right) \mathrm{d}x_a \tag{4.7–13}$$

Integral C rješava se jednostavnom supstitucijom i parcijalnom integracijom. Nakon računanja dobije se distribucijski faktor potencijala kao međusobna otpornost elemenata a i b:

$$
\begin{aligned}
(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(x_4 - x_3)}\Bigg[& (x_4 - x_1)\operatorname{ar\,sh}\frac{x_4 - x_1}{y_a - y_b} - \\
& - (x_3 - x_1)\operatorname{ar\,sh}\frac{x_3 - x_1}{y_a - y_b} - \\
& - (x_4 - x_2)\operatorname{ar\,sh}\frac{x_4 - x_2}{y_a - y_b} + \\
& + (x_3 - x_2)\operatorname{ar\,sh}\frac{x_3 - x_2}{y_a - y_b} + \\
& + \sqrt{(y_a - y_b)^2 + (x_4 - x_2)^2} - \\
& - \sqrt{(y_a - y_b)^2 + (x_3 - x_2)^2} - \\
& - \sqrt{(y_a - y_b)^2 + (x_4 - x_1)^2} + \\
& + \sqrt{(y_a - y_b)^2 + (x_3 - x_1)^2}\Bigg]
\end{aligned}
\tag{4.7–14}
$$

Predznaci u uglatoj zagradi dani su za slučaj $x_a > x_b$. Ako je $x_a < x_b$, predznaci su suprotni, tj. ispred zagrade je znak minus.

Koristeći se poznatim izrazom:

$$
\operatorname{ar\,sh}\frac{a}{b} = \ln\left|\frac{a}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1}\right| \tag{4.7–15}
$$

može se, ukoliko je potrebno, (4.7–14) napisati i upotrebom logaritamske funkcije.

b) Usporedni elementi uzemljivača u prostoru

Pri proračunu složenog uzemljivača potrebno je naći i međusobne otpornosti elemenata stvarnog uzemljivača i njegova lika. Ako su ti elementi paralelni, postupak je isti kao u točki a), samo se pri proračunu uzima umjesto izraza:

$$
r = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}
$$

izraz:

$$r = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \tag{4.7–16}$$

gdje je:

$$z_a - z_b = 2h,$$

tj. jednako dvostrukoj dubini ukopavanja uzemljivača.

Tom supstitucijom u formuli (4.7–14) gdje se pojavljuje $(y_a - y_b)$ treba stajati:

$$\sqrt{(y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}.$$

4.7.3. Međusobni otpori uzemljenja za uspravni raspored elemenata uzemljivača

a) Elementi se sijeku pod pravim kutom

Takav raspored elemenata uzemljivača moguć je ako se promatraju elementi samo stvarnog uzemljivača ili samo njegova lika.

Za slučaj da se elementi uzemljivača nalaze u međusobnom položaju kao što je to na slici 4.7–3, potencijal koji struja elementa b stvara u točki A na elementu a prema (4.7–4) je:

$$V_A = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mathrm{d}x_b}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2}} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)} \cdot D \tag{4.7–17}$$

gdje je:

$$D = \operatorname{ar\,sh}\frac{x_2 - x_a}{y_a - y_b} - \operatorname{ar\,sh}\frac{x_1 - x_a}{y_a - y_b} \tag{4.7–18}$$

Integral D riješen je u [L5].

Potencijal koji struja elementa b stvara na elementu a dobije se iz (4.7–6), (4.7–17):

$$V_{ab} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} V_A \mathrm{d}y_a,$$

tj.

$$V_{ab} = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{y_1}^{y_2} \left(\operatorname{ar\,sh}\frac{x_2 - x_a}{y_a - y_b} - \operatorname{ar\,sh}\frac{x_1 - x_a}{y_a - y_b} \right) \mathrm{d}y_a \tag{4.7–19}$$

Međusobna otpornost elemenata a i b distribucijski je faktor potencijala:

$$(VDF)_{ab} = \frac{V_{ab}}{I_b} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot F \tag{4.7–20}$$

gdje je:

$$F = \int_{y_1}^{y_2} \left(\operatorname{ar\,sh} \frac{x_2 - x_a}{y_a - y_b} - \operatorname{ar\,sh} \frac{x_1 - x_a}{y_a - y_b} \right) \mathrm{d}y_a \tag{4.7–21}$$

Integriranjem, parcijalnom integracijom i korištenjem gotovim izvedenim formulama [L5] može se riješiti integral F.

Njegovim rješenjem i zamjenom rješenja u (4.7–19) dobiva se konačna formula za izračun distribucijskog faktora potencijala:

$$\begin{aligned}(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \Bigg\{ & \Bigg[(y_2 - y_b) \operatorname{ar\,sh} \frac{x_2 - x_a}{y_2 - y_b} + \\ & + (x_2 - x_a) \operatorname{ar\,sh} \frac{y_2 - y_b}{x_2 - x_a} \Bigg] - \\ & - \Bigg[(y_1 - y_b) \operatorname{ar\,sh} \frac{x_2 - x_a}{y_1 - y_b} + \\ & + (x_2 - x_a) \operatorname{ar\,sh} \frac{y_1 - y_b}{x_2 - x_a} \Bigg] - \\ & - \Bigg[(y_2 - y_b) \operatorname{ar\,sh} \frac{x_1 - x_a}{y_2 - y_b} + \\ & + (x_1 - x_a) \operatorname{ar\,sh} \frac{y_2 - y_b}{x_1 - x_a} \Bigg] + \\ & + \Bigg[(y_1 - y_b) \operatorname{ar\,sh} \frac{x_1 - x_a}{y_1 - y_b} + \\ & + (x_1 - x_a) \operatorname{ar\,sh} \frac{y_1 - y_b}{x_1 - x_a} \Bigg] \Bigg\}\end{aligned} \tag{4.7–22}$$

Ako formulu (4.7–22) treba izraziti s pomoću logaritamske funkcije umjesto s pomoću areasinushiperbolne funkcije, tada se koristi zamjenom (4.7–15).

U formuli (4.7–22) moguće je da su neki članovi neodređeni. Neodređeni članovi (4.7–22) pojavljuju se kada su ispunjeni uvjeti da je bilo koji par članova pod 1, 2, 3 i 4 jednak nuli.

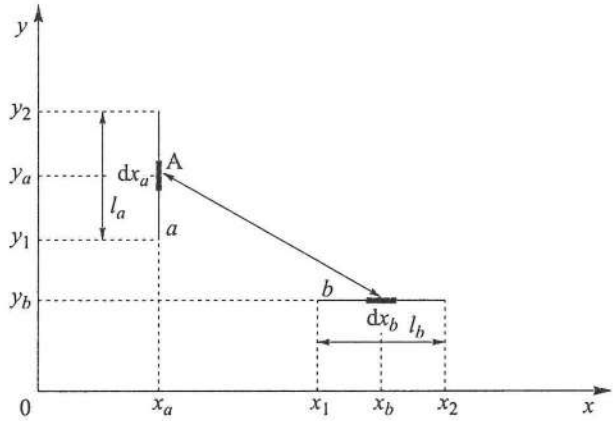
1.	2.	3.	4.
$y_2 - y_b = 0$	$y_2 - y_b = 0$	$y_1 - y_b = 0$	$y_1 - y_b = 0$
$x_2 - x_a = 0$	$x_1 - x_a = 0$	$x_2 - x_a = 0$	$x_1 - x_a = 0$

U tim se slučajevima uzima granična vrijednost toga člana koja je jednaka nuli, tj. izrazi u kojima se pojavljuju neodređenosti ne nalaze se u formuli za međusobnu otpornost elemenata.

Ako izraze u uglatim zagradama (4.7–22) obilježimo s: a_{12}, a_{23}, a_{41} i a_{34}, tada se distribucijski faktori potencijala mogu napisati u obliku:

$$(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot (a_{12} - a_{23} - a_{41} + a_{34}) \tag{4.7–23}$$

Predznaci u (4.7–23) uzeti su prema rasporedu elemenata uzemljivača koji je prikazan na slici 4.7–3, koja je identična slici 4.7–4.a). Za drukčiji raspored elemenata predznaci se mijenjaju. Neki karakteristični rasporedi na osnovi kojih se mogu izvesti svi ostali, dani su na slici (4.7–4.b), c), d).



Sl. 4.7–3. Izračunavanje međusobnih otpornosti za elemente *a* i *b*.

Izrazi za međusobne otpornosti za te slučajeve su:

raspored prema slici 4.7–4.b)

$$(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot a_{12} \tag{4.7–24}$$

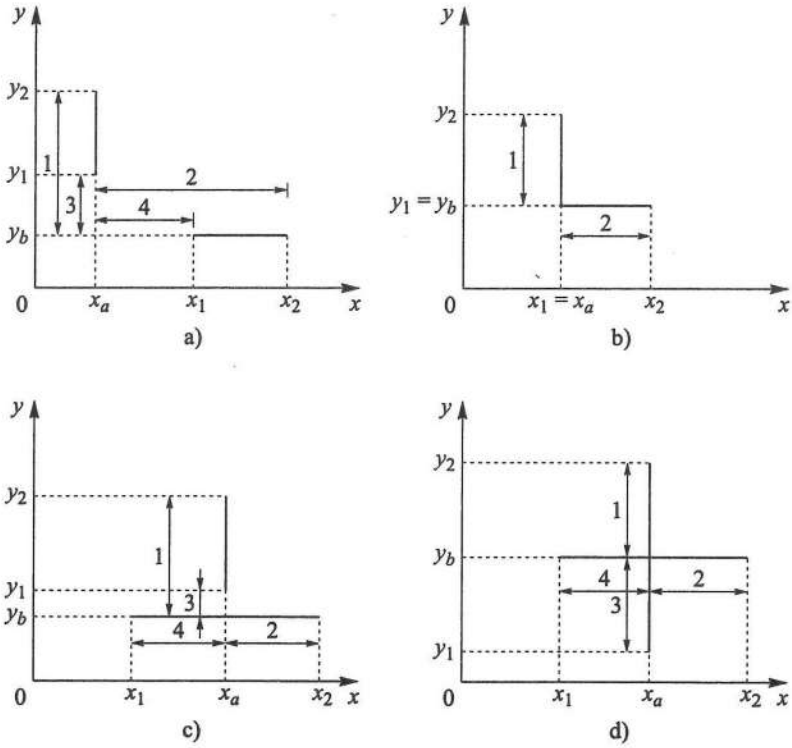
raspored prema slici 4.7–4.c)

$$(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot (a_{12} - a_{23} - a_{34} + a_{41}) \tag{4.7–25}$$

raspored prema slici 4.7–4.d)

$$(VDF)_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot (a_{12} - a_{23} + a_{34} + a_{41}) \tag{4.7–26}$$

Predznaci ispred izraza a pozitivni su, osim u slučaju kada je raspored elemenata kao na slici 4.7–4.a) i 4.7–4.c). U tom se slučaju smatra kao da je na duljini 3 i 4 na slici 4.7–4.a) i na duljini 3 na slici 4.7–4.c), postavljen vodič u kojem teče struja suprotnog predznaka, pa se u odgovarajućim članovima (4.7–26) uzima negativan predznak.



Sl. 4.7–4. Različite mogućnosti rasporeda elemenata koji se nalaze na pravcima koji se sijeku pod pravim kutom.

b) Elementi su međusobno mimoilazni

Ukoliko se traži međusobna otpornost elemenata stvarnog uzemljivača i elemenata njegova lika, tada se pojavljuju i slučajevi kada su ti elementi međusobno mimoilazni.

Za slučaj elemenata koji se nalaze na međusobno mimoilaznim pravcima, kao na slici 4.7–5, potencijal koji stvara struja elementa b u bilo kojoj točki A drugog elementa a iznosi (4.7–4):

$$V_A = \frac{\rho_z \cdot I_b}{4\pi(x_2 - x_1)} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mathrm{d}x_b}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}} =$$

$$= \frac{\rho_z \cdot I_b}{4\pi(x_2 - x_1)} \cdot G \tag{4.7–27}$$

gdje je:

$$G = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mathrm{d}x_b}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}} \tag{4.7–28}$$

Rješenjem integrala G dobiva se:

$$G = \ln\left| x_2 - x_a + \sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \right| -$$

$$- \ln\left| x_1 - x_a + \sqrt{(x_1 - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \right| \tag{4.7–29}$$

Iz (4.7–6) i (4.7–27) dobiva se potencijal koji struja elementa b stvara na elementu a:

$$V_{ab} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} V_A \mathrm{d}y_a = \frac{\rho_z I_b}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{y_1}^{y_2} G \mathrm{d}y_a \tag{4.7–30}$$

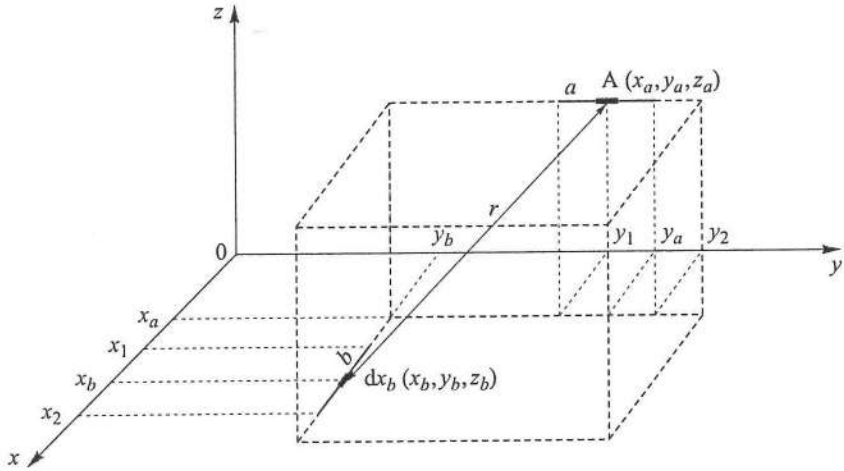
Međusobna otpornost elemenata a i b distribucijski je faktor potencijala:

$$(VDF)_{ab} = \frac{V_{ab}}{I_b} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot H \tag{4.7–31}$$

gdje je:

$$H = \int_{y_1}^{y_2} G\mathrm{d}y_2 = \int_{y_1}^{y_2} \ln\left| x_2 - x_a + \sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \right| -$$

$$- \ln\left| x_1 - x_a + \sqrt{(x_1 - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \right| \mathrm{d}y_a \tag{4.7–32}$$



Sl. 4.7–5. Određivanje međusobnih otpornosti elemenata *a* i *b*.

Zamjenom u podintegralnoj funkciji u integralu H s:

$$x_i - x_a + \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \qquad i = 1, 2$$

dobiva se rješenje integrala H [L5]. Izračunom integrala H u formuli (4.7–32) dobiva se formula za međusobni otpor elemenata uzemljivača koji su međusobno mimoilazni (4.7–33).

$$VDF_{ab} = \frac{\rho_z}{4\pi(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \cdot$$

$$\cdot \left[(y_2 - y_b) \ln\left| \frac{x_2 - x_a}{\sqrt{(y_2 - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}} + \sqrt{\frac{(x_2 - x_a)^2}{\sqrt{(y_2 - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}} + 1} \right| + \right.$$

$$+ (x_2 - x_a) \ln\left| \frac{y_2 - y_b}{\sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (z_a - z_b)^2}} + \sqrt{\frac{(y_2 - y_b)^2}{\sqrt{(x_2 - x_a)^2 + (z_a - z_b)^2}} + 1} \right| -$$

$$
\begin{aligned}
&-(y_2-y_b)\ln\left|\frac{x_1-x_a}{\sqrt{(y_2-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(x_1-x_a)^2}{\sqrt{(y_2-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|-\\
&-(x_1-x_a)\ln\left|\frac{y_2-y_b}{\sqrt{(x_1-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(y_2-y_b)^2}{\sqrt{(x_1-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|-\\
&-(x_2-x_a)\ln\left|\frac{y_1-y_b}{\sqrt{(x_2-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(y_1-y_b)^2}{\sqrt{(x_2-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|-\\
&-(y_1-y_b)\ln\left|\frac{x_2-x_a}{\sqrt{(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(x_2-x_a)^2}{\sqrt{(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|+\\
&+(y_1-y_b)\ln\left|\frac{x_1-x_a}{\sqrt{(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(x_1-x_a)^2}{\sqrt{(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|+\\
&+(x_1-x_a)\ln\left|\frac{y_1-y_b}{\sqrt{(x_1-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+\sqrt{\frac{(y_1-y_b)^2}{\sqrt{(x_1-x_a)^2+(z_a-z_b)^2}}+1}\right|+\\
&+2(z_a-z_b)\operatorname{arctg}\frac{y_2-y_b+x_2-x_a+\sqrt{(x_2-x_a)^2+(y_2-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}{z_a-z_b}-\\
&-2(z_a-z_b)\operatorname{arctg}\frac{y_2-y_b+x_1-x_a+\sqrt{(x_1-x_a)^2+(y_2-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}{z_a-z_b}-\\
&-2(z_a-z_b)\operatorname{arctg}\frac{y_1-y_b+x_2-x_a+\sqrt{(x_2-x_a)^2+(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}{z_a-z_b}+\\
&+2(z_a-z_b)\operatorname{arctg}\frac{y_1-y_b+x_1-x_a+\sqrt{(x_1-x_a)^2+(y_1-y_b)^2+(z_a-z_b)^2}}{z_a-z_b}\Bigg]
\end{aligned}
\tag{4.7–33}
$$

Predznaci u (4.7–33) dani su za raspored elemenata kao na slici (4.7–5). Isto kao u (4.7–23), ovisno od međusobnog položaja elemenata, mogu se mijenjati i predznaci.

[L1] Neiman, S. R., Kalantarov, P. L.: *Teoretičeskie osnovbi eletrotehniki*, Č. Z. Gosznergoizdat, 1948.

[L2] Oslon, A. B.: *Električeskie stancii, set i sistembi*, Itogi nauki i tehniki 1964, Moskva, 1966.

[L3] Oslon, A. B.: *Raščet nekotorbih vidov složenbih zazamlitelei*, Zlektričestvo, No. 4, 1958.

[L4] Oslon, A. B.: *Raščet pramougolbih zazemlćših konturov*, Zlektričestvo, No. 7, 1959.

[L5] Dwight, H. B.: *Tables of Integrals*, The Macmillan Company, New York, 1961.

[L6] Škuletić, S.: *Koeficijenti raspodjele struja kod mrežastih uzemljivača*, Magistarski rad, Beograd, jun 1975.

4.7.5. Sažetak

Za izračun distribucijskih faktora potencijala (*VDF*) kao međusobne otpornosti različito postavljenih elemenata uzemljivača u funkciji međusobnih udaljenosti u navedenim koordinatama i otpornosti tla ρ_z.

U literaturi [L2, L3 i L4] mogu se naći formule za međusobne otpornosti različito postavljenih elemenata uzemljivača u funkciji različitih parametara.

Ovdje su formule dane u funkciji koordinata krajnjih točaka odsječaka na koje je podijeljen promatrani uzemljivač.

Dobivene formule pogodne su za proračun složenih mrežastih uzemljivača na računalu. Pri ovom proračunu moguće je lako mijenjati različite parametre odsječaka i izvoditi analize njihovih utjecaja na karakteristične veličine uzemljivača.

5. OKOMITO UKOPANI UZEMLJIVAČI

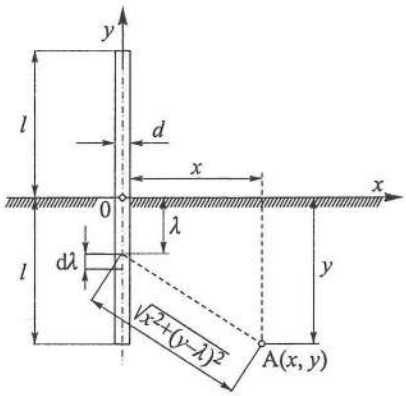
5.1. ŠTAPNI UZEMLJIVAČ

Okomito ukopani uzemljivači su vodiči, obično duljine od 1 m do 3 m, okomito ukopani u dubinu zemlje tako da im je gornji kraj ispod površine tla onoliko kolika je zona smrzavanja (za naše kontinentalne uvjete oko 50 cm). Zbog njihova štapastog oblika nazivaju se štapni uzemljivači. Kao štapni uzemljivači upotrebljavaju se čelične pocinčane cijevi vanjskog promjera od najmanje 38 mm i debljine stijenke najmanje 3,5 mm ili bakrene cijevi vanjskog promjera od najmanje 30 mm i debljina stijenke od najmanje 2,5 mm. Osim cijevi upotrebljava se i profilirani pocinčani čelik, kutni čelik L 65 mm × 64 mm × 7 mm, profili U 6,5 i T 6 ili koji drugi odgovarajući profil. Prema hrvatskoj normi HD 637 S1:1999 dopušteni su štapni uzemljivači najmanjih dimenzija: čelična vruće pocinčana cijev promjera 25 mm debljine stijenke 2 mm, okrugla šipka vruće pocinčana promjera 16 mm, okrugla šipka s ekstrudiranom bakrenom prevlakom promjera 15 mm, bakrena cijev promjera 20 mm debljine stijenke 2 mm.

5.1.1. Teorijske osnove

Izrazi za otpor uzemljivača i raspodjelu potencijala zemlje do uzemljivača određuju se metodom odslikavanja. U zemlji koja se prostire neograničeno oko uzemljivača nalazi se izvor struje iz kojega izvire struja jednoliko raspodijeljena duž uzemljivača, slika 5.1–1.

Ukupna duljina izvora struje, zbog duljine stvarnog i odslikanog izvora l_z, jednaka je $2l$, gdje je l duljina uzemljivača. Ukupna struja iznosi $2I_z$, dakle dvostruka struja koja izvire iz uzemljivača duljine l. Ako se ordinatna os postavi u os uzemljivača, a ishodište koordinatnog sustava na površinu zemlje, položaj uzemljivača definiran je kao na slici 5.1–1.



Sl. 5.1–1. Položaj štapnog ili cijevnog uzemljivača za određivanje potencijala na površini zemlje i otpora uzemljenja.

Iz elementa $d\lambda$ na udaljenosti λ od ishodišta koordinatnog sustava, izvire struja:

$$2I_z \frac{d\lambda}{2l}$$

Udaljenost točke A od elementa $d\lambda$ iznosi:

$$\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}$$

Potencijal točke A, zbog struje koja izvire iz elementa $d\lambda$, iznosi:

$$dV = 2I_z \frac{d\lambda}{2l} \cdot \frac{\rho_z}{4\pi\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}} \tag{5.1–1}$$

gdje je ρ_z otpornost tla. Iz formule (5.1–1) proizlazi potencijal točkastog izvora u homogenom tlu:

$$V = \frac{i \cdot \rho_z}{4\pi r} \tag{5.1–2}$$

gdje je:

i struja točkastog izvora

r udaljenost točke A od točkastog izvora.

Integriranjem po duljini uzemljivača dobiva se potencijal točke A:

$$V_{(x,y)} = 2I_z \frac{\rho_z}{8\pi l} \int_{-l}^{+l} \frac{d\lambda}{\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}} = I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + (y + l)^2} + y + l}{\sqrt{x^2 + (y - l)^2} + y - l} \tag{5.1–3}$$

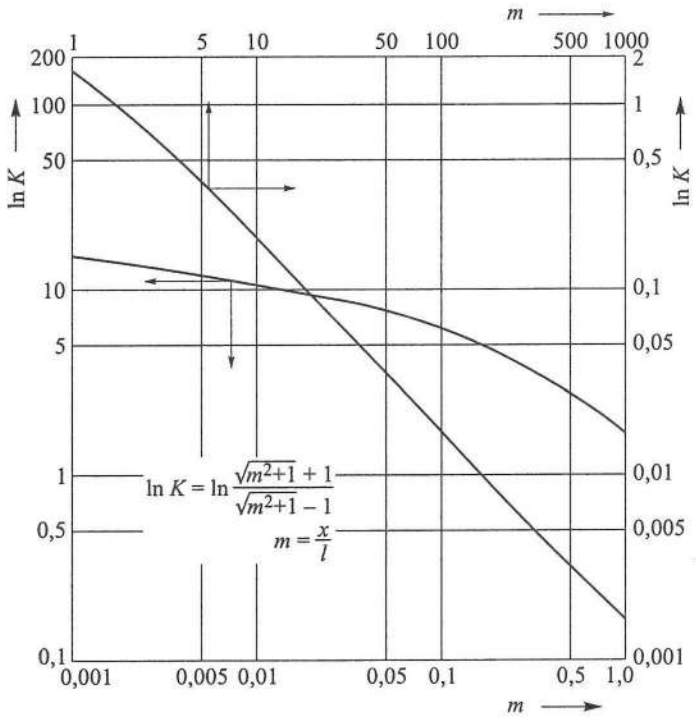
Potencijal u ravnini površine zemlje određuje se iz (5.1–3) uvrštavanjem $y = 0$, ako se još uvede da je $x = ml$, dobiva se:

$$V_{(x,0)} = I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} = \frac{I\rho_z}{4\pi l} \ln K \tag{5.1–4}$$

gdje je:

$$K = \frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}, \quad m = \frac{x}{l} \tag{5.1–5}$$

Ovisnost $\ln K$ o m prikazana je na slici 5.1–2.



Sl. 5.1–2. Ovisnost veličine $\ln K$ o m za računanje potencijala u ravnini površine zemlje.

Potencijal u sredini cijevi u ravnini površine zemlje određuje se iz (5.1–3) uvrštavanjem $x = d/2$ i $y = 0$:

$$V_{\left(\frac{d}{2},0\right)} = I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + l^2} + l}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + l^2} - l} \tag{5.1–6}$$

gdje je:

l duljina štapnog uzemljivača, m

I_z struja kroz štapni uzemljivač, A

x udaljenost od uzemljivača na površini tla, m

d promjer (vanjski promjer) štapnog uzemljivača, odnosno ekvivalentni promjer štapnog uzemljivača koji nema kružni presjek, m

ρ_z otpornost tla, Ωm.

Ta formula može se pojednostavniti uvrštavanjem:

$$l\sqrt{1+\left(\frac{d}{2l}\right)^2} \cong l+\frac{d^2}{8l} \tag{5.1–7}$$

jer je:

$$\sqrt{1+a} \cong 1+\frac{a}{2}$$

kad je $d/4l^2 \ll 1$. Odatle uzimajući još u obzir da je $d^2/8l \ll 1$ slijedi

$$V_{\left(\frac{d}{2},0\right)} = I_z\frac{\rho_z}{4\pi l}\ln\frac{16l^2}{d^2} = I_z\frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \tag{5.1–8}$$

Otpor uzemljenja dobiva se kao omjer potencijala i struje:

$$\frac{R_z}{2} = \frac{V_{\left(\frac{d}{2},0\right)}}{2I} = \frac{\rho_z}{4\pi l}\ln\frac{4l}{d} \tag{5.1–9}$$

Omjer potencijala i struje daje polovicu otpora uzemljenja R_z, jer se taj omjer odnosi na uzemljivač duljine $2l$. Slijedi:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \tag{5.1–10}$$

ili

$$R_z = \frac{\rho_z}{l}K_š \tag{5.1–11}$$

gdje je:

$$K_š = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{4l}{d}$$

Za grubu procjenu, otpor uzemljenja štapnog uzemljivača moguće je računati po formuli:

$$R_z \cong \frac{\rho_z}{l} \tag{5.1–12}$$

Napon koraka razlika je potencijala na duljini koraka x_k, pa je prema (5.1–4):

$$U_k = I_z \frac{\rho_z}{4\pi l}\left[\ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} - \ln\frac{\sqrt{(m+a)^2+1}+1}{\sqrt{(m+a)^2+1}-1}\right] \qquad (5.1\text{–}13)$$

gdje je $a = x_k/l$ pri $x_k = 1$ m, odnosno za bilo koju udaljenost od uzemljivača $a = x_k/l$.

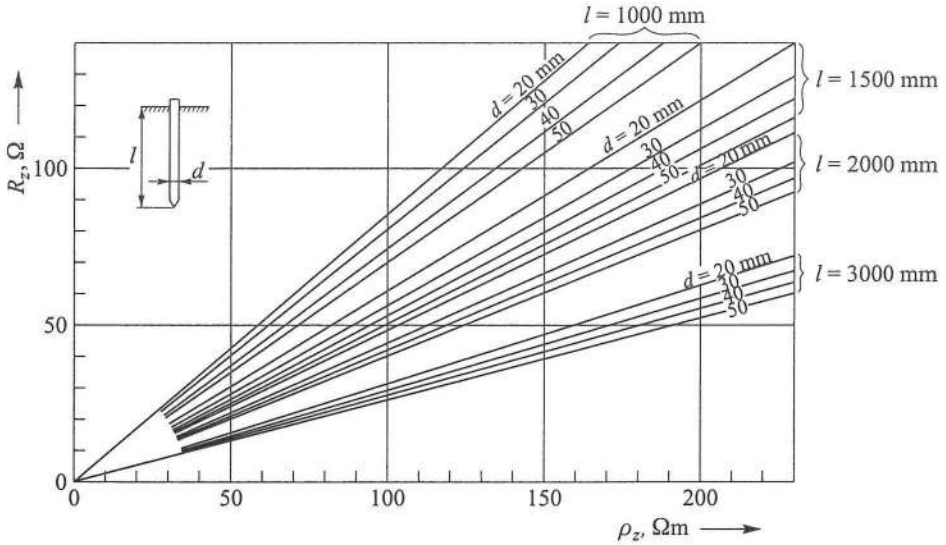
Vrijednost logaritama može se odrediti iz dijagrama na slici 5.1–2, uzimajući jednom vrijednost m a drugi put vrijednost $m + a$ kao polaznu veličinu. Najveći napon koraka dobiva se za $m = d/(2l)$, te za duljinu koraka $x_k = 1$ m:

$$m + a = \frac{d+2}{2l}$$

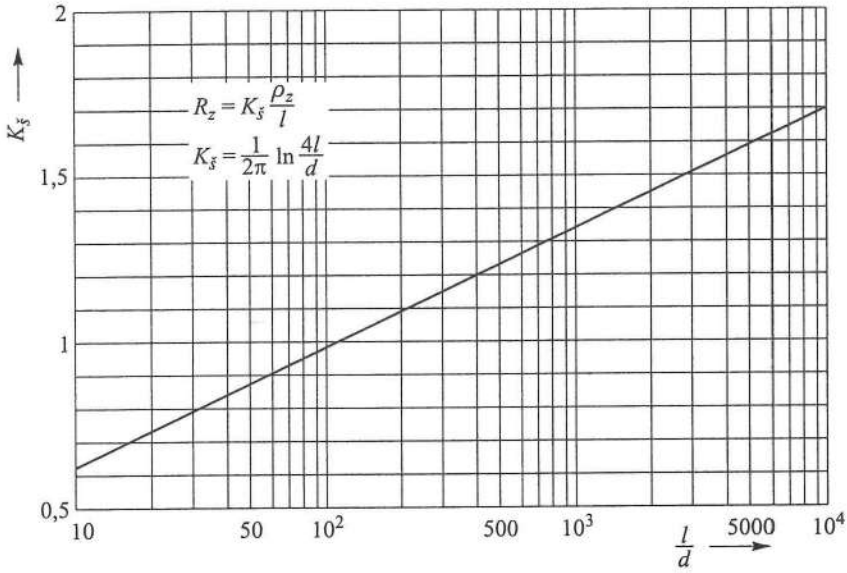
Najveći napon koraka ujedno je i dodirni napon, jer je napon koraka na udaljenosti 1 m od uzemljenja. Ovo je i najveća strmina opadanja potencijala oko štapnog uzemljivača.

5.1.2. Određivanje otpora uzemljenja R_z štapnog uzemljivača s pomoću dijagrama $R_z = f(\rho_z)$ i $K_š = f(l/d)$

Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača [24] može se izračunati upotrebom dijagrama na slikama (5.1–3 i 5.1–4); učitavanjem izravno iz slike 5.1–3 $R_z = f(\rho_z)$, za različite duljine i promjere štapnih uzemljivača, a iz slike 5.1–4 očitava se $K_š$ i uvrštava u formulu (5.1–11).



Sl. 5.1–3. Otpor uzemljenja R_z štapnog ili cjevastog uzemljivača u ovisnosti o otpornosti tla ρ_z za razne duljine l i promjere d uzemljivača.



Sl. 5.1–4. Faktor $K_š$, za računanje otpora uzemljenja, štapnog ili cjevastog uzemljivača u ovisnosti o omjeru l/d.

5.1.3. Određivanje otpora uzemljenja R_z štapnog uzemljivača upotrebom dijagrama $R_z = f(\rho_z / K_{šl})$

Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača promjera 40 mm i duljine l u zemlji otpornosti $\rho_z = 100\ \Omega$m može se očitati iz dijagrama na slici 5.1–5. Ako promjer nije 40 mm, može se upotrijebiti formula:

$$R_z = \frac{\rho_z}{K_{šl}} \tag{5.1–14}$$

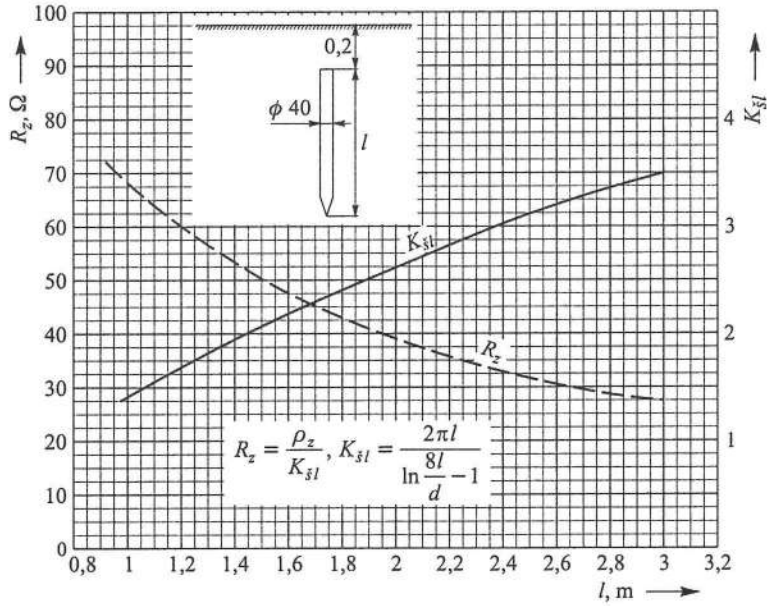
gdje je:

$$K_{šl} = \frac{2\pi l}{\ln \frac{8l}{d} - 1} \tag{5.1–14a}$$

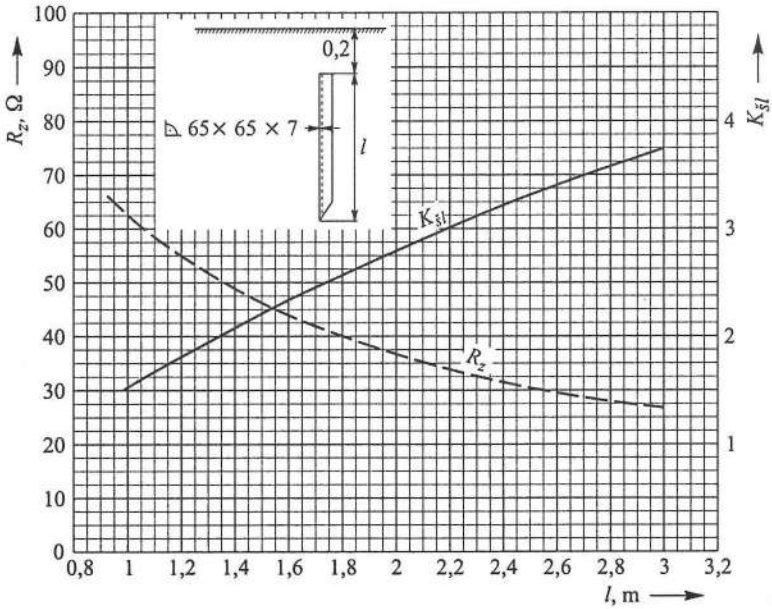
ekvivalentna duljina uzemljivača u m. U (5.1–14a) l treba uvrstiti u m.

Otpor uzemljenja R_z očitan iz dijagrama na slikama 5.1–5. i 5.1–6. odgovara uzemljivaču ukopanom u tlo otpornosti $\rho_z = 100\ \Omega$m. Za druge vrijednosti otpornosti tla otpor uzemljenja treba proračunati prema formuli:

$$R'_z = R_z\left(\rho_z = 100\,\Omega\text{m}\right) \cdot \frac{\rho_z}{100} \tag{5.1–15}$$



Sl. 5.1–5. Otpor uzemljenja R_z štapnoga cjevastog uzemljivača promjera 40 mm u ovisnosti o duljini l pri otpornosti tla $\rho_z = 100$ Ωm i faktor $K_{šl}$ za računanje otpora uzemljenja prema formuli (5.1–14) ako je promjer uzemljivača različit od 40 mm.



Sl. 5.1–6. Otpor uzemljenja R_z štapnog uzemljivača od kutnog željeza 65 × 65 × 7 mm u ovisnosti o duljini l pri otpornosti tla $\rho_z = 100$ Ωm i faktor $K_{šl}$ za računanje otpora uzemljenja prema formuli (5.1–14).

5.1.4. Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača ukopanog na određenu dubinu od površine tla

Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača ukopanog na dubinu t (dubina od površine zemlje do gornjg ruba uzemljivača), duljine l i promjera d računa se prema formuli [26]

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{4t_h + l}{4t_h - l}\right)\right] \qquad (5.1\text{–}16)$$

gdje je:

t dubina ukopanog uzemljivača, tj. dubina od površine tla do gornjeg ruba uzemljivača, m

$t_h = t + \frac{l}{2}$ tj. dubina do polovice duljine štapnog uzemljivača, gledajući od površine tla, m.

Otpor uzemljenja armirano-betonskog stupa promjera d ukopanog na duljinu temeljne stope l, prema [23] izračuna se po formuli (vidi tablicu 11.7–7):

$$R_z = \frac{1{,}75\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \qquad (5.1\text{–}17)$$

gdje je:

d promjer ili ekvivalentni promjer armirano-betonskog stupa (temelja stupa), m

l dubina ukopa odnosno duljina armirano-betonskog stupa koji je ukopan u zemlju, računajući od površine tla do donjeg ruba temelja stupa, m.

5.1.5. Sažetak

Računajući otpor uzemljenja prema formuli (5.1–9) zaključujemo da se taj otpor vrlo malo smanjuje s povećavanjem promjera cijevi. Zato nije korisno smanjivati otpor uzemljenja tog uzemljivača povećanjem promjera cijevi, već je mnogo korisnije povećati njegovu duljinu. No kod tog se nailazi na teškoće pri ukopavanju. Zbog toga je, kad prilike zahtijevaju da otpor uzemljenja bude malen, najbolje ukopati više štapnih uzemljivača pa ih paralelno spojiti. Posebnu pozornost treba obratiti na to da je štapni uzemljivač ukopan u zemljište sa što manjom otpornošću tla, primjerice u glinasto tlo, oranicu, crnicu i sl. Također u kontinentalnim uvjetima gdje dolazi do smrzavanja tla i do dubine od 0,5 m, potrebno je štapni uzemljivač ukopati u zemlju ispod dubine smrzavanja.

Primjer 5A

Izračunajte otpor uzemljenja štapnoga cijevnog uzemljivača za sljedeće podatke:
– otpornost tla: $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$

- duljina uzemljivača: 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m i 3 m (ukopani po cijeloj duljini, okomito u dubinu zemlje)
- vanjski promjer uzemljivača: ∅1″ (33,70 mm), ∅1,5″ (48,30 mm), ∅2″ (60,30 mm) ∅2,5″ (76,10 mm) i ∅3″ (88,90 mm), a unutarnji promjer cijevi naveden je u colima (1″, 1,5″, itd.).

Izračune otpora uzemljenja izradite prema formulama: (5.1–10, 5.1–11, i 5.1–12).

$$R_{zA} \cong \frac{\rho_z}{l}, \quad R_{zB} = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d}, \quad R_{zC} = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{8l}{d} - 1\right), \quad R_{zD} = K_{\check{s}}\frac{\rho_z}{l}$$

Rezultati izračuna dani su u tablici 5.1–1 za navedene vanjske promjere i duljine cijevi.

Tablica 5.1–1. Otpor štapnog uzemljivača R_z (Ω) duljine l (m) i vanjskog promjera d (m) u tlu otpornosti ρ_z = 100 Ωm po formulama (5.1–10, 5.1–11 i 5.1–12).

Duljina cijevi x, m	d = 33,70 mm (1″)				d = 48,30 mm (1,5″)			
	R_{zA}	R_{zB}	R_{zC}	R_{zD}	R_{zA}	R_{zB}	R_{zC}	R_{zD}
1	100,00	76,02	71,14	79,00	100,00	70,29	65,41	72,00
1,5	66,67	54,98	51,73	56,60	66,67	51,16	47,91	54,00
2	50,00	43,53	41,08	45,00	50,00	40,66	38,22	42,00
2,5	40,00	36,24	34,29	36,80	40,00	33,95	32,00	35,80
3	23,33	31,17	29,54	32,60	23,33	29,26	27,63	30,60

Duljina cijevi x, m	d = 60,30 mm (2″)				d = 76,10 mm (2,5″)			
	R_{zA}	R_{zB}	R_{zC}	R_{zD}	R_{zA}	R_{zB}	R_{zC}	R_{zD}
1	100,00	66,76	61,88	70,00	100,00	63,06	58,17	65,00
1,5	66,67	48,81	45,55	50,00	66,67	46,34	43,08	48,00
2	50,00	38,90	36,45	40,00	50,00	37,04	34,60	38,00
2,5	40,00	32,53	30,58	33,60	40,00	31,06	29,10	32,00
3	23,33	28,51	26,45	29,00	23,33	26,85	25,22	27,00

Duljina cijevi x, m	d = 88,90 mm (3″)			
	R_{zA}	R_{zB}	R_{zC}	R_{zD}
1	100,00	60,58	55,70	62,00
1,5	66,67	44,69	41,43	46,50
2	50,00	35,81	33,36	36,50
2,5	40,00	30,07	28,11	31,00
3	23,33	26,02	24,39	27,00

Iz izračuna otpora uzemljenja vidimo znatne razlike između R_{zA} i R_{zD}, dok su neznatne razlike između R_{zB} i R_{zC}. Za izračun otpora uzemljenja treba upotrebljavati u prvome redu formulu za R_{zB} (jer se dobiva nešto veća vrijednost), a zatim formulu za R_{zC}. Za grubu procjenu otpora treba upotrebljavati formulu za R_{zA} i štapne uzemljivače duljine > 1,5 m jer se pri manjoj duljini uzemljivača dobivaju velike pogreške. Korištenje gra-

fičkim metodama po formuli R_{zD} daje manju pogrešku u odnosu na izračun po formuli $R_{zA} \cong \rho_z / l$ i u granicama točnosti grafičke metode.

Primjer 5B

Izračunajte napon koraka za štapni uzemljivač duljine $l = 2$ m, vanjskog promjera $d = 60{,}3$ mm, ukopanog u zemlju specifičnog otpora $\rho_z = 100\ \Omega$m, za struju zemljospoja $I_z = 300$ A.

Potencijal na uzemljivaču računamo po formuli:

$$V_z = I_z R_z = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{300 \cdot 100}{2\pi \cdot 2} \ln \frac{4 \cdot 2}{0{,}0603} = 11668{,}917\,\text{V} \approx 11669\,\text{V}$$

Do približno istog rezultata dolazimo primjenom formule (5.1–4). Stavljanjem za:

$$m = \frac{d}{2l} = \frac{0{,}0603}{2 \cdot 2} = 0{,}015075$$

potencijal uzemljivača iznosi:

$$V_z = \frac{I_z \rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} = \frac{300 \cdot 100}{4 \cdot \pi \cdot 2} \ln \frac{\sqrt{0{,}015075^2+1}+1}{\sqrt{0{,}015075^2+1}-1} = 11669{,}278\,\text{V} \approx 11669\,\text{V}$$

Napon koraka za razmak stopala $a = x/l$ računa se po formuli (5.1–13):

$$U_k = \frac{I_z \rho_z}{4\pi l} \left[\ln \frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1} - \ln \frac{\sqrt{(m+a)^2+1}+1}{\sqrt{(m+a)^2+1}-1} \right]$$

gdje je x udaljenost od uzemljivača u m. Za standardni napon koraka razmak stopala je 1 m te je $a = 1/l$.

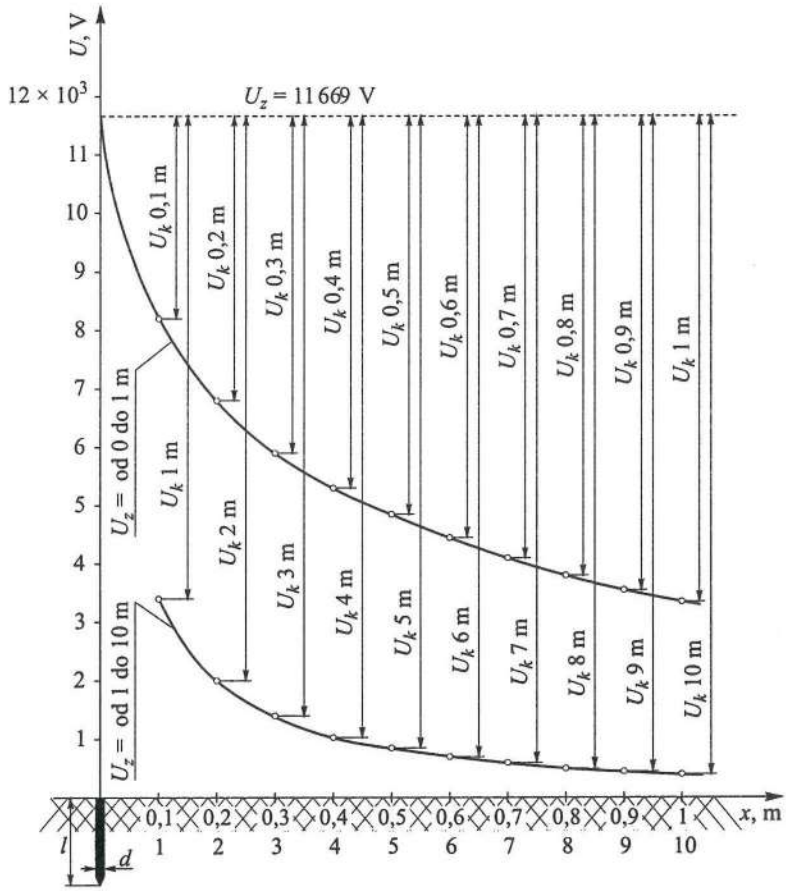
Tablica 5.1–2. Napon koraka u točkama $x = 0{,}1$ do $x = 10$ m i napon u tim točkama

x, m	$a = \frac{x}{l}$	$\ln \frac{\sqrt{(m+a)^2+1}+1}{\sqrt{(m+a)^2+1}-1}$	U_k	Napon u točki $V_z - U_k$, V	Standardni napon koraka $U_{k1\text{m}}$, V
0,1	0,05	6,8528574	3489	8180	
0,2	0,10	5,7172181	4845	6824	
0,3	0,15	5,0024930	5698	5971	
0,4	0,20	4,4825676	6319	5350	
0,5	0,25	4,0760208	6804	4865	
0,6	0,30	3,7440666	7200	4469	
0,7	0,35	3,4651359	7533	4136	
0,8	0,40	3,2259430	7819	3850	
0,9	0,45	3,0177079	8068	3601	

Tablica 5.1–2. – nastavak.

x, m	$a = \frac{x}{l}$	$\ln \frac{\sqrt{(m+a)^2+1}+1}{\sqrt{(m+a)^2+1}-1}$	U_k	Napon u točki $V_z - U_k$, V	Standardni napon koraka U_{k1m}, V
1	0,50	2,8342945	8286	3383	8286*
2	1,00	1,7416663	9591	2078	1305
3	1,50	1,2392347	10190	1479	599
4	2,00	0,9557273	10529	1140	339
5	2,50	0,7756166	10744	925	215
6	3,00	0,6517373	10892	777	148
7	3,50	0,56115697	10999	670	107
8	4,00	0,4931114	11081	588	82
9	4,50	0,4394167	11145	524	64
10	5,00	0,3962011	11197	472	52

* Za udaljenost od 1 m od uzemljivača (x = 1 m) napon koraka jednak je dodirnom naponu U_d.



Sl. 5.1–7. Raspodjela potencijala i napon koraka za štapni uzemljivač iz primjera 5B.

Rezultati izračuna prikazani su u tablici 5.1–2, a raspodjela potencijala i napon koraka za navedene udaljenosti od uzemljivača prikazane su na slici 5.1–7. Gornja krivulja prikazuje razdiobu potencijala na udaljenosti od 1 m od uzemljivača, a donja na udaljenosti od 1 m do 10 m od štapnog uzemljivača.

Iz izračuna se zorno vidi opadanje standardnog napona koraka udaljavanjem od uzemljivača. Tako je napon koraka na udaljenosti od 1 m od štapnog uzemljivača $U_{k1\mathrm{m}}$= 8286 V, napon je koraka na udaljenosti od 2 do 1 m od uzemljivača: 1305 V, na udaljenosti od 3 do 2 m od 599 V i tako dalje opada kako se udaljavamo od uzemljivača. Za udaljenost od uzemljivača do 1 m dan je izračun nestandardnog napona koraka povećanjem razmaka za 0,1 m kako bi se zorno prikazale vrijednosti i opadanje potencijala. Tako napon koraka na udaljenosti od 0,1 m od uzemljivača iznosi 3489 V i veći je nego za standardni napon koraka na udaljenosti od 2 i 1 m koji iznosi 1305 V. Tako je i za sve druge standardne napone koraka, a na većim udaljenostima od štapnog uzemljivača.

Primjer 5C

Otpori uzemljenja, izračunani po formuli (5.1–17) za vanjski promjer cijevnog uzemljivača d = 33,50 mm, d = 60 mm i d = 88,25 mm i za duljine uzemljivača l = 1, 2, 3, 4 i 8 m kao umnožak izračunane vrijednosti i otpornosti tla ρ_z.

Tablica 5.1–3. Otpor cijevnog (štapnog) uzemljivača za navedene primjere cijevnog uzemljivača, dan kao funkcija za različite vrijednosti otpornosti tla ρ_z.

Duljina cijevi l, m	Otpor cijevnog uzemljivača R_z, Ω		
	d = 33,50 mm	d = 60 mm	d = 88,25 mm
1	0,761 ρ_z	0,670 ρ_z	0,606 ρ_z
2	0,436 ρ_z	0,390 ρ_z	0,358 ρ_z
3	0,312 ρ_z	0,285 ρ_z	0,260 ρ_z
4	0,246 ρ_z	0,223 ρ_z	0,207 ρ_z
8	0,137 ρ_z	0,125 ρ_z	0,117 ρ_z

Primjer 5D

Izračunajte otpor uzemljenja štapnog uzemljivača duljine l = 2 m, promjera d = 60,3 mm, ukopanog u tlo otpornosti uzemljenja ρ_z = 100 Ωm za dubine ukopa (od gornjega ruba uzemljivača do tla) t = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 i 1 m.

Izračun je dan u tablici 5.1–4. za

$$t_h = t + \frac{l}{2}, \mathrm{m}, \quad R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{4t_h + l}{4t_h - l}\right)\right]$$

Tablica 5.1–4. Izračun otpora uzemljenja štapnog uzemljivača.

t, m	t_h, m	$\frac{\rho_z}{2\pi l}$	$\ln\frac{2l}{d}$	$\frac{1}{2}\ln\frac{4t_h+l}{4t_h-l}$	R_z, Ω
0	1	7,9577472	4,1947175	0,5493061	37,752
0,2	1,2			0,4436516	36,911
0,4	1,4			0,3736072	36,354
0,6	1,6			0,3233135	35,953
0,8	1,8			0,2852724	35,651
1	2			0,2554128	35,413

Iz tablice 5.1–4 vidimo neznatno smanjenje otpora uzemljenja pri povećanju dubine ukopa od $t = 0$ (dubina od gornjeg ruba uzemljivača do površine tla) do $t = 1$, dubine ukopa 1 m. Razlika otpora uzemljenja od (37,752 – 35,413) = 2,339 Ω za promjenu dubine ukopa od 1 m praktično ne znači mnogo, ako se uzme u obzir kolika je, pri većim dubinama ukopa, korist za stabilizaciju a i smanjenje otpornosti tla, ρ_z. Zbog drugog razloga i zbog smrzavanja tla (u kontinentalnim uvjetima) odlučili smo se za dubinu ukopa $t \geq 0{,}5$ m.

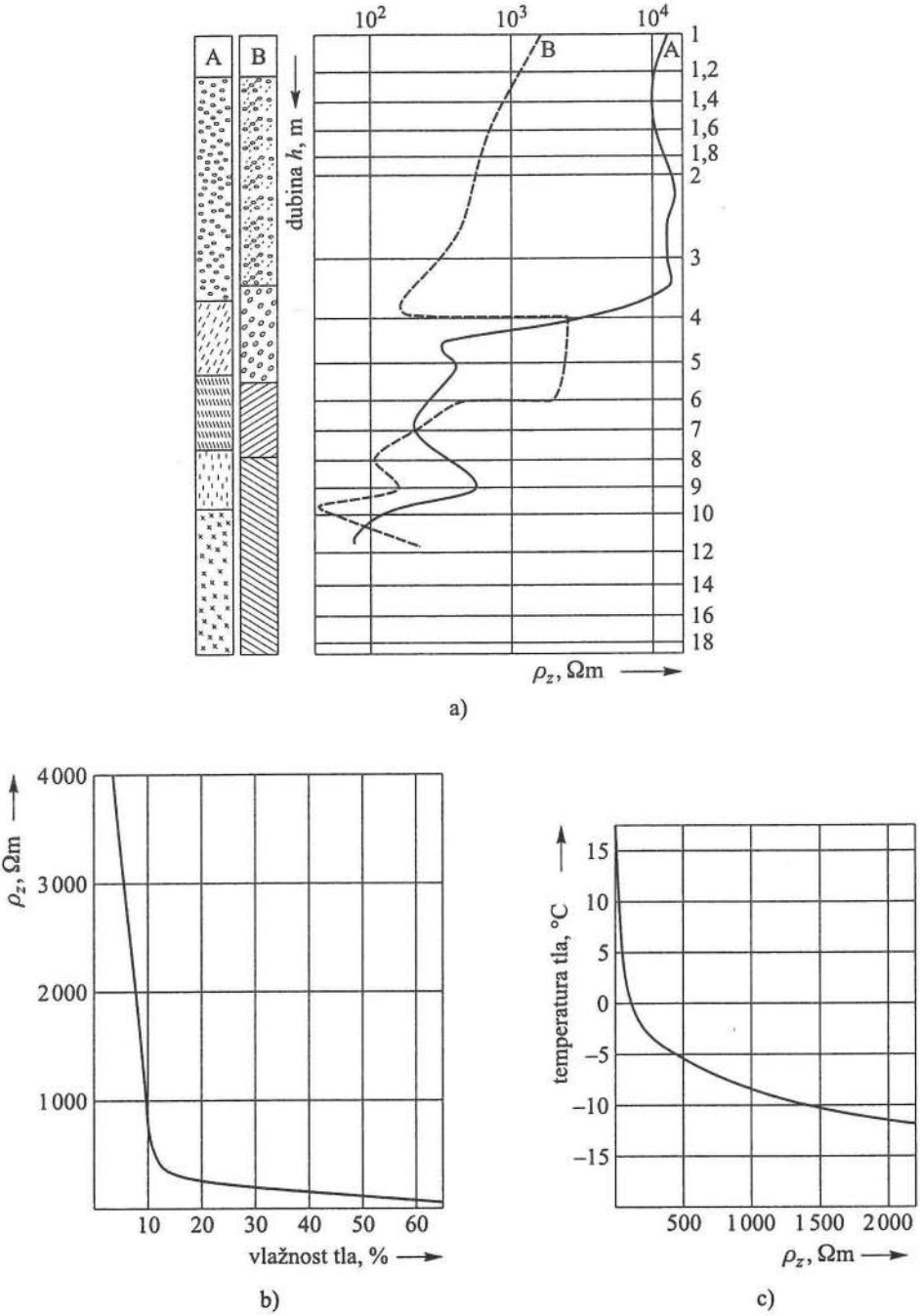
5.2. DUBOKI ŠTAPNI (OKOMITI) UZEMLJIVAČ

Duboki štapni uzemljivači zabijaju se u velike dubine, i do 20 m (obično od 3 m do 20 m) zbog polaganja u slojeve tla veće vlažnosti i time manje i stabilnije vrijednosti otpora uzemljenja. Za duboke štapne uzemljivače upotrebljavaju se tanji štapni uzemljivači, promjera primjerice: ∅16 mm i ∅19 mm, oni se pobijaju u zemlju posebnim uređajima. Dakle, upotrebljava se znatno duži uzemljivač od uobičajenoga cjevastog uzemljivača (duljine od 1 do 3 m) i tanji od najmanjega dopuštenoga cjevastog uzemljivača unutarnjeg promjera 38 mm [L1].

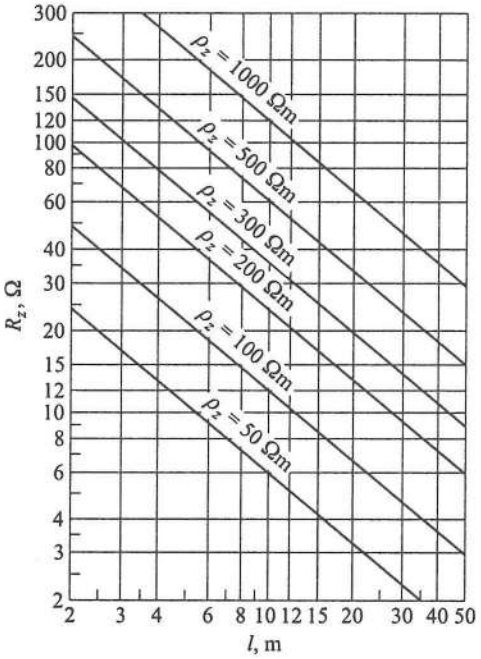
Na slici 5.2–1 prikazana je promjena otpornosti tla s dubinom od 1 do 18 m za vrste zemljišta A i B s različitim vrijednostima otpornosti tla na dubini do 18 m, [L1], te ovisnost otpornosti tla o vlažnosti i temperaturi.

Analizirajući otpor uzemljenja štapnog uzemljivača u ovisnosti o duljini dolazimo do sljedećih zaključaka:

- duljina uzemljivača, slika 5.2–2, znatnije utječe na smanjenje otpora uzemljenja nego promjer. To upućuje na sve veće korištenje uzemljivačima većih duljina od standardnih 1 – 3 m, kao npr. 4, 5, 6, 10, 18, 20 m.
- za ostvarenje što boljeg spoja uzemljivača sa zemljom upotrebljavaju se razne kemikalije, npr.: NaCl (morska sol), ali je problem s korozijom uzemljivača, $MgSO_4$ (magnezijum sulfat). Za pobijanje dubokih štapnih uzemljivača upotrebljava se specijalni uređaj za pobijanje štapnih uzemljivača ∅16 mm i ∅19 mm.



Sl. 5.2–1. Duboki štapni uzemljivač: a) promjena otpora tla ρ_z s dubinom h, b) ovisnost otpornosti tla ρ_z o vlažnosti i c) ovisnost otpornosti tla ρ_z o temperaturi.



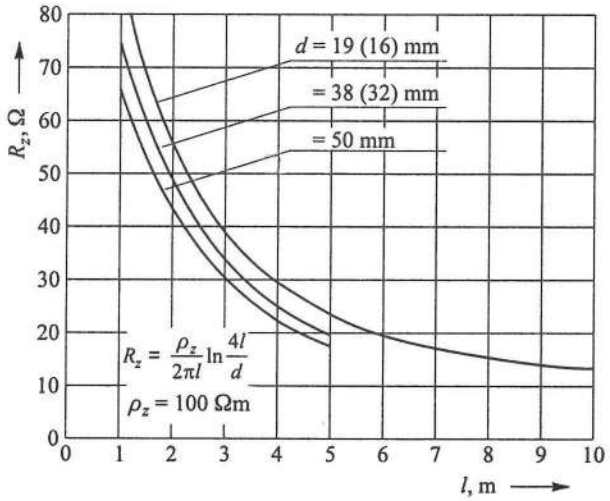
Vrijednosti su izračunane prema formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

gdje je:

l duljina štapa u m
d promjer štapa u m (ovdje pretpostavljeno 0,02 m)
ρ_z otpornost tla u Ωm

Sl. 5.2–1d. Otpor uzemljenja štapnih uzemljivača okomito zabijenih u homogeno tlo promjera 20 mm u ovisnosti od duljine i otpornosti tla prema hrvatskoj normi HD 637 S1:1999.*



Sl. 5.2–2. Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača R_z u ovisnosti o duljini l za navedene promjere d, pri otpornosti tla od 100 Ωm.

* Dijagram na slici 5.2–1d. treba koristiti prvenstveno za duboke štapne uzemljivače (prim. autora).

Primjer 5E

Izračunajte relativni napon na površini tla za plitki i duboki štapni uzemljivač vanjskog promjera: ∅19 mm, ∅38 mm, ∅50 mm, otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega$m za duljine od 2 m do 20,5 m i na udaljenosti od uzemljivača od 1 m do 20 m i za ostale podatke prema tablici 5.2–1.

Relativni napon zemljišta na udaljenosti x od uzemljivača računa se po formuli [24]:

$$u_x = \frac{U_x}{U_z} = \frac{\ln \dfrac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{\sqrt{x^2 + l^2} - l}}{2 \ln \dfrac{4l}{d}} \tag{5.2–1}$$

Rezultati izračuna dani su u tablici 5.2–1.

Tablica 5.2–1. Relativni napon tla u_x za različite udaljenosti od uzemljivača (x) duljine (l) i promjer uzemljivača (d).

d	l	R_z	u_x					
mm	m	Ω	$x = 1$ m	$x = 2$ m	$x = 3$ m	$x = 5$ m	$x = 10$ m	$x = 20$ m
50	2		0,285	0,174	0,124	0,077	0,039	
19	2,47	40	0,262	0,166	0,120	0,076	0,039	
16	2,55		0,249	0,159	0,115	0,073	0,038	
50	3		0,333	0,218	0,161	0,104	0,054	
19	3,66	30	0,302	0,205	0,155	0,102	0,054	
16	3,76		0,297	0,203	0,153	0,101	0,054	
50	5		0,385	0,274	0,199	0,146	0,080	0,041
19	5,75	22	0,345	0,250	0,198	0,138	0,077	0,040
16	5,9		0,339	0,247	0,195	0,137	0,076	0,039
19	20	6,6	0,442	0,359	0,311	0,251	0,173	0,034
16	20,5		0,443	0,358	0,308	0,248	0,172	0,033

Kako se iz rezultata vidi, znatno je manji potencijal na površini zemljišta, te napon koraka i dodirni napon za uzemljivače velikih dubina 20,0 i 20,5 m, kao i znatno niža vrijednost otpora uzemljenja, što je i osnovni cilj izvedbe dubokih štapnih uzemljivača. Također vidimo da je znatno manji napon koraka dubokog uzemljivača u odnosu na standardne plitke uzemljivače, a naročito na kritičnom dijelu, tj. na udaljenosti $x = 1$, $x = 2$ i $x = 3$ m od uzemljivača, što je veoma važno.

Tako je relativni napon u_x za duboki uzemljivač $l = 20$ m, $u_{x1} = 0{,}442$, $u_{x2} = 0{,}359$, $u_{x3} = 0{,}311$, a za plitki uzemljivač ($d = 50$ mm, $l = 2$ m) $u_{x1} = 0{,}285$, $u_{x2} = 0{,}174$ i $u_{x3} = 0{,}124$.

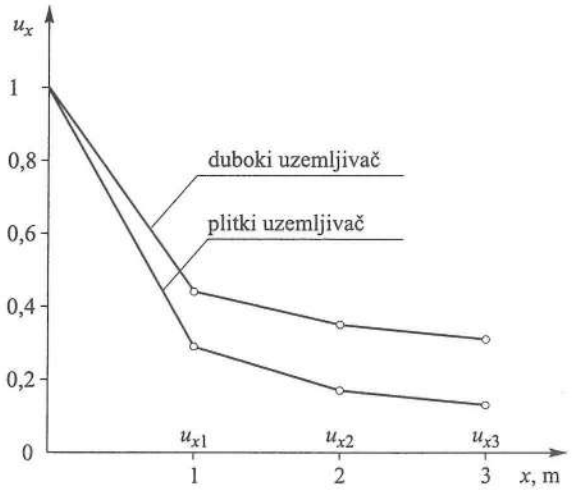
Tako su relativne razlike potencijala za duboki uzemljivač:

$$\Delta u_1 = 1 - 0{,}442 = 0{,}558$$
$$\Delta u_2 = 0{,}442 - 0{,}359 = 0{,}083$$
$$\Delta u_3 = 0{,}354 - 0{,}311 = 0{,}048$$

a za plitki uzemljivač:

$$\Delta u_1 = 1 - 0{,}285 = 0{,}715$$
$$\Delta u_2 = 0{,}285 - 0{,}174 = 0{,}111$$
$$\Delta u_3 = 0{,}174 - 0{,}124 = 0{,}050$$

dakle znatno veće, što je svakako nepovoljno, kako je to prikazano na sl. 5.2–3.



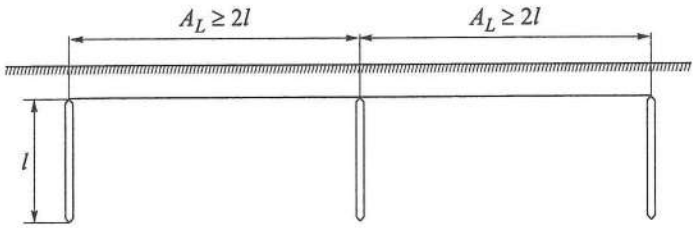
Slika 5.2–3. Razdioba relativnog napona u_x na udaljenosti od uzemljivača x za plitki (l = 2 m) i duboki uzemljivač (l = 20 m).

[L1] *Les prises de terre*, Catu Paris, 1975.

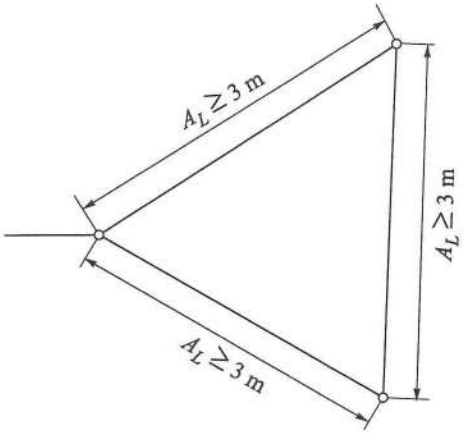
5.3. UZEMLJIVAČ SASTAVLJEN OD ŠTAPNIH UZEMLJIVAČA

Više štapnih uzemljivača može se spojiti u mrežu kako bi se ostvario željeni otpor uzemljenja sustava. Spajanje štapnih uzemljivača moguće je na više načina, ali su u praksi najznačajniji:

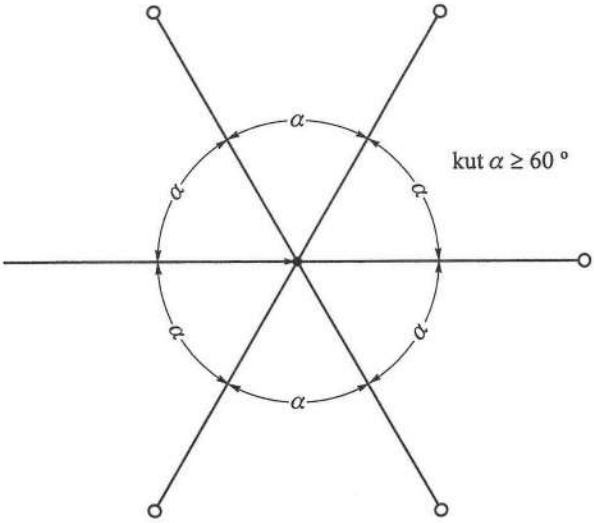
- spoj više štapnih uzemljivača u liniju (v. sl. 5.3–1) uz najmanji mogući međusobni razmak $A_L = 2l$,
- spoj više štapnih uzemljivača u trokut (v. sl. 5.3–2) uz najmanji mogući međusobni razmak $A_L = 3$ m,
- zrakasti spoj štapnih uzemljivača (v. sl. 5.3–3), kut između dvaju susjednih štapnih uzemljivača ne smije biti manji od 60°, jer se zbog međusobnog utjecaja potencijala uzemljivača otpor uzemljenja povećava.



Sl. 5.3–1. Spoj više štapnih uzemljivača u liniju na razmaku $A_L \geq 2l$.



Sl. 5.3–2. Spoj više štapnih uzemljivača u trokut na razmaku $A_L \geq 3$ m.



Sl. 5.3–3. Zrakasti spoj štapnih uzemljivača pod kutem $\alpha \geq 60°$.

Neki autori smatraju da između uzemljivača treba biti veći razmak i to u iznosu trostruke duljine ako su u liniji i četverostruke ako su zrakasti. Razumljivo, što je veći razmak između uzemljivača, to je manji međusobni utjecaj i manje povećanje otpora.

Ukupni otpor uzemljenja R_{zn} uzemljivača sastavljenog od više štapnih uzemljivača računa se po formuli:

$$R_{zn} = \frac{R_z}{\mu n} \tag{5.3–1}$$

gdje je:

n broj štapnih uzemljivača

μ koeficijent međusobnog utjecaja uzemljivača očitava se iz tablice 5.3–1 za uzemljivače u liniji

A_L razmak štapnih uzemljivača, m.

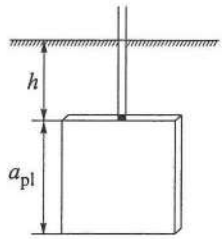
Tablica 5.3–1. Ovisnost međusobnog utjecaja štapnih uzemljivača μ o broju uzemljivača n i o omjeru razmaka uzemljivača A_L i duljine štapnih uzemljivača l.

		μ					
Broj štapova		4	6	10	20	40	60
$\frac{A_L}{l}$	2	0,80	0,76	0,70	0,65	0,60	0,55
	3	0,85	0,80	0,76	0,70	0,66	0,64

5.4. PLOČASTI UZEMLJIVAČ

Pločasti uzemljivač obično je kvadratna ploča od pocinčanog čelika s površinom ploče (s jedne strane) najmanje 0,5 m^2 i debljine ≥ 3 mm ili od bakra debljine ≥ 2 mm. Ploča se polaže okomito u zemlju, tako da je gornji rub ploče najmanje 1 m duboko u zemlji. Ako ima više ploča preporučuje se da međusobni razmak iznosi najmanje 3 m.

Pločasti uzemljivač ukopava se okomito kako bi se osigurao bolji kontakt sa zemljom. U vodoravnom položaju ukopana ploča može, ako dođe do slijeganja zemlje, izgubiti kontakt s donje strane. Na taj se način poveća otpor uzemljenja.



Slika 5.4–1. Pločasti uzemljivač ukopan u dubinu h.

Dubina ukopa gornjeg ruba ploče prema propisima [6] iznosi najmanje 1 m. No, nema opravdanja da se propisuje najmanja dubina od 1 m, već to može biti samo preporuka s obzirom na smrzavanje tla u kontinentalnim uvjetima i isušivanje tla u plićim slojevima tla.

Tako bi s obzirom na propis [16] kojim se određuje dubina polaganja trakastog uzemljivača od 0,5 do 1 m, bilo preporučljivo da se polaganje pločastog uzemljivača ograniči na najmanju dubinu od 0,5 m (dubina ukopa gornjeg ruba ploče. U daljnjim razmatranjima ovu dubinu nazvat ćemo dubina ukopa h).

Prema [24] otpor uzemljenja metalne ploče, jednostrane površine, do 1 m^2 računa se po pojednostavljenoj formuli:

$$R_z = 0{,}25\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}, \quad \Omega \tag{5.4–1}$$

gdje je:

ρ_z otpornost zemlje, Ωm
a_{pl} duljina stranice kvadratne ploče, m
A_L udaljenost između ploča, m
h dubina ukopa ploče, od gornjeg ruba ploče do površine tla, m.

Prema [32] otpor uzemljenja metalne ploče površine 1 m^2 na dubini ukopa gornjeg ruba ploče u ravnini zemlje, računa se po formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} \approx 0{,}443\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}, \quad \Omega \tag{5.4–2}$$

Prema [18] ne čini se velika pogreška ako se pretpostavi da je gustoća struje ravnomjerno raspoređena po površini ploče, te se za dubinu ukopa od 0,5 m otpor uzemljenja metalne ploče računa po formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi a_{\mathrm{pl}}} \approx 0{,}318\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}, \quad \Omega \tag{5.4–3}$$

Također prema [18] za dubine ukopa veće od 0,5 m, otpor uzemljenja metalne ploče računa se po formuli:

$$R_z \approx 0{,}23\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}, \quad \Omega \tag{5.4–4}$$

Prema propisima [6] otpor uzemljenja metalne ploče može se izračunati po formuli:

$$R_z \approx R_r = 0{,}222\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}, \quad \Omega \tag{5.4–5}$$

R_r je otpor rasprostiranja.

Za više međusobno spojenih jednakih pločastih uzemljivača ukupni otpor uzemljenja računa se kao otpor paralelnog spoja otpora:

$$\frac{1}{R_{zu}} = \frac{1}{R_{z1}} + \frac{1}{R_{z2}} + \frac{1}{R_{z3}} + \ldots + \frac{1}{R_{zn}} \tag{5.4–6}$$

Međutim, otpor tako složenog uzemljivača nešto je veći zbog međusobnog utjecaja uzemljivača, pogotovo ako se pločasti uzemljivači ukopaju na udaljenosti manjoj od 20 m. Tada se ukupni otpor uzemljenja računa po formuli [18]:

$$R_{zu} = \frac{R_z}{n}\eta_{\mathrm{pl}}, \quad \Omega \tag{5.4–7}$$

gdje je:

$\eta_{\mathrm{pl}} > 1$ koeficijent kojim se uzima u obzir međusobni utjecaj pločastih uzemljivača očitava se iz tablice 5.4–1

n broj pločastih uzemljivača

A_{pl} međusobna udaljenost pločastih izmjenjivača, m.

Tablica 5.4–1. Ovisnost koeficijenta međusobnog utjecaja ploča pločastog uzemljivača η_{pl} o broju ploča n i o omjeru razmaka pločastih uzemljivača A_{pl} i duljine stranice ploče a_{pl} za dubinu ukopa $h = 0{,}5$ m [18].

		η_{pl}								
n		2	3	4	6	8	10	13	16	20
$\frac{A_{\mathrm{pl}}}{a_{\mathrm{pl}}}$	2	1,257	1,429	1,573	1,798	1,965	2,099	2,262	2,394	2,538
	2,5	1,199	1,332	1,441	1,613	1,744	1,850	1,978	2,083	2,197
	3	1,177	1,301	1,407	1,563	1,679	1,771	1,882	1,973	2,069
	3,5	1,152	1,249	1,332	1,460	1,557	1,634	1,727	1,803	1,886
	4	1,144	1,247	1,327	1,445	1,534	1,604	1,688	1,756	1,830

Prema [18] koeficijent η_{pl} pri dubini ukopa $h = 0{,}5$ m računa se po formuli:

$$\eta_{\mathrm{pl}(0{,}5\mathrm{m})} = n^{0{,}2} \cdot 1{,}1^{\left(2{,}2-\sqrt{\frac{A_{\mathrm{pl}}}{a_{\mathrm{pl}}}}\right)n^{0{,}43}} \tag{5.4–8}$$

gdje je:

A_L udaljenost između pločastih uzemljivača, m

a_{pl} duljina stranice kvadratne ploče, m

k_{pl} faktor korekcije otpora pločastog uzemljivača za dubinu ukopa do 1 m.

Točnost je ove formule oko 5 %.

Povećanje dubine ukopa h od 0,5 m na 1 m smanjuje otpor uzemljenja, prema [18], za oko 2 % te za dubinu ukopa od 1 m faktor η_{pl} u tablici 5.4–1 treba pomnožiti s faktorom k_{pl}, koji iznosi:

$$k_{\mathrm{pl}} = 1{,}02 \cdot 0{,}96^{h} \tag{5.4–9}$$

Tako se dobiva formula za izračunavanje ukupnog otpora složenoga pločastog uzemljivača [18] sastavljenog od više ploča za različite dubine ukopa:

$$R_{zu} = 0{,}23 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}} \cdot n} k_{\mathrm{pl}} \cdot \eta_{\mathrm{pl}}$$

i daljnjim uvrštavanjem dobivamo:

$$R_{zu} = 0{,}235 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}} n^{-0{,}8} \cdot 1{,}1^{\left(2{,}2 - \sqrt{\frac{A_L}{a_{\mathrm{pl}}}}\right) n^{0{,}43}} \cdot 0{,}96^{h}, \quad \Omega \tag{5.4–10}$$

gdje je:

$$n^{-0{,}8} = \frac{1}{n} \cdot n^{0{,}2} = n^{-1} \cdot n^{0{,}2} = n^{-0{,}8}.$$

Primjer 5F

Izračunajte otpor pločastog uzemljivača upotrebom navedenih formula i utvrdite razliku u postocima računajući prema najnižoj vrijednosti otpora (koji smatramo referentnim) za sljedeće parametre: $\rho_z = 100\ \Omega\mathrm{m}$, $a_{\mathrm{pl}} = 1$ m i $h = 1$ m.

Rezultati izračuna dani su u tablici 5.4–2.

Tablica 5.4–2. Otpor uzemljenja R_z pločastog uzemljivača računat prema različitim formulama i razlika u % prema referentnoj vrijednosti $R_z = 0{,}222\rho_z/a_{\mathrm{pl}}$.

Formula	$0{,}25 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}$	$0{,}443 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}$	$0{,}318 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}$	$0{,}23 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}$	$0{,}222 \frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}$
R_z, Ω	25,00	44,30	31,80	23,00	22,22
Razlika u %	12,51	99,37	43,11	3,51	0,00

U tablici vidimo izračune otpora pločastog uzemljivača uporabom pet različitih formula (5.4–1), (5.4–2), (5.4–3), (5.4–4), (5.4–5) i znatne razlike u odnosu na izračun uporabom formule (5.4–5). Uporabom te formule dobivamo najmanju vrijednost.

Primjer 5G

Uporabom formula (5.4–3) i (5.4–5) izračunajte otpor složenoga pločastog uzemljivača, sastavljenog od četiriju pločastih uzemljivača sljedećih podataka: $a_{\mathrm{pl}} = 1$ m, $n = 4$, $A_L = 3$ m, $\rho_z = 100\ \Omega\mathrm{m}$ za dubinu ukopa $h = 0{,}5$ m i $h = 1$ m.

Upotrebom formula (5.4–4) i (5.4–7) i primjenom tablice 5.4–1 otpor složenog uzemljivača za dubinu ukopa $h = 0{,}5$ m iznosi:

$$R_{zu} = \frac{R_z}{n}\eta_{\mathrm{pl}}$$

Otpor jednog pločastog uzemljivača:

$$R_z = 0{,}23\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}} = 0{,}23\frac{100}{1} = 23\ \Omega$$

Iz tablice 5.4–2 za broj pločastih uzemljivača $n = 4$ na udaljenosti $a = 3$ m te za izmjere $A_{\mathrm{pl}}/a_{\mathrm{pl}} = 3/1 = 3$, koeficijent $\eta_{\mathrm{pl}} = 1{,}407$ iz tablice 5.4–1 i otpor uzemljenja iznosi:

$$R_{zu} = \frac{R_z}{n}\cdot\eta_{\mathrm{pl}} = \frac{23}{4}\cdot 1{,}407 = 8{,}09\ \Omega$$

Za dubinu ukopa $h = 1$ m otpor složenog uzemljivača uporabom formule (5.4–10) iznosi:

$$R_{zu} = 0{,}235\frac{\rho_z}{a_{\mathrm{pl}}}n^{-0{,}8}\cdot 1{,}1^{\left(2{,}2-\sqrt{\frac{A_{\mathrm{pl}}}{a_{\mathrm{pl}}}}\right)n^{0{,}43}}\cdot 0{,}96^h =$$

$$= 0{,}235\frac{100}{1}4^{-0{,}8}\cdot 1{,}1^{\left(2{,}2-\sqrt{\frac{3}{1}}\right)4^{0{,}43}}\cdot 0{,}96^{0{,}5} = 7{,}29\ \Omega$$

Uočite neznatnu razliku između jednostavnog izračuna (formula (5.4–4) i primjenom tablice 5.4–1) i složenijeg izračuna po formuli (5.4–10). Razlika iznosi 0,8 Ω ili 9,9 % u odnosu na izračun po formuli (5.4–10).

Za dubinu ukopa četiri pločasta uzemljivača $h = 1$ m mijenja se posljednji član $0{,}96^h$ po formuli (5.4–10) za 2 %.

Za ista četiri pločasta uzemljivača povećanjem međusobnog razmaka znatno se smanjuje otpor složenog uzemljivača po formuli (5.4–7) u istom omjeru kako se mijenja faktor η_{pl} i iznosi: za $A_{\mathrm{pl}}/a_{\mathrm{pl}} = 2{,}5$ prema 2 = 8,4 %, za $A_{\mathrm{pl}}/a_{\mathrm{pl}} = 3{,}5$ prema 3 = 5,3 % i za $A_{\mathrm{pl}}/a_{\mathrm{pl}} = 4$ prema 3,5 = 0,4 %.

[L1] Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism, Volume I (Book)*, Oxford University Press, Oxford, England, 3rd ed., 1992.

6. TRAKASTI UZEMLJIVAČI

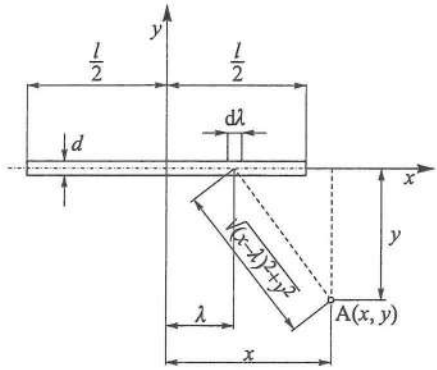
Vodoravno ukopani uzemljivači vodiči su koji se obično ravno polažu u dubinu zemlje od 0,5 do 1 m. U našoj praksi za takve uzemljivače najviše se upotrebljavaju pocinčane čelične trake, pa se takvi uzemljivači nazivaju i trakasti uzemljivači. Najmanji im je presjek 100 mm^2, a najmanja debljina 3,5 mm. Rjeđe se upotrebljavaju bakrene trake najmanjeg presjeka 50 mm^2 i najmanje debljine 2 mm, ili bakreno uže najmanjeg presjeka 35 mm^2. U novije vrijeme sve se više upotrebljavaju uzemljivači od bakrenog užeta ili šipki, posebno u agresivnom tlu i pri uzemljenju elektroenergetskih postrojenja s velikom strujom zemljospoja. Metalne instalacije ukopane u zemlju koje imaju određeni presjek i duljinu, a spojene su na sustav uzemljenja, proračunavaju se kao trakasti uzemljivači. To su metalni plaštevi kabela, podzemni metalni cjevovodi, razne metalne konstrukcije itd.

Prema hrvatskoj normi HD 637 S1:1999 za visokonaponska postrojenja dopušteni su trakasti uzemljivači najmanjih dimenzija: čelična vruće pocinčana traka, valjana ili rezana sa zaobljenim rubovima, presjeka 90 mm^2, debljine 3 mm, okrugla žica, čelik, vruće pocinčana, promjera 10 mm, bakrena traka presjeka 50 mm^2, debljine 2 mm, bakreno uže presjeka 25 mm^2, bakreno pokositreno uže presjeka 25 mm^2.

6.1. TEORIJSKE OSNOVE

Trakasti uzemljivač izveden kao traka ili uže, nalazi se u neograničenom homogenom tlu prema slici 6.1–1, te iz njega izvire struja $2I_z$. Da bi se odredio potencijal na površini zemlje i otpor uzemljenja, polazi se od potencijala točke A zbog struje $2I_z \mathrm{d}\lambda / l$ iz elementa uzemljivača $\mathrm{d}\lambda$:

$$\mathrm{d}V = 2I_z \frac{\mathrm{d}\lambda}{l} \cdot \frac{\rho_z}{4\pi\sqrt{(x-\lambda)^2 + y^2}} \tag{6.1–1}$$



Sl. 6.1–1. Položaj trakastog uzemljivača za određivanje potencijala površine zemlje i otpora uzemljenja.

Integriranjem po osi x od $-l/2$ do $+l/2$ dobiva se:

$$V = 2I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(x+\frac{l}{2}\right)^2 + y^2} + x + \frac{l}{2}}{\sqrt{\left(x-\frac{l}{2}\right)^2 + y^2} + x - \frac{l}{2}} \tag{6.1–2}$$

Potencijal u sredini uzemljivača ($x = 0$, $y = d/2$) iznosi:

$$V_{\left(0,\frac{d}{2}\right)} = 2I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}} \tag{6.1–3}$$

gdje je:

d promjer nadomjesnog vodiča kružnog presjeka trakastog uzemljivača, m

l duljina trakastog uzemljivača, m.

Nakon uvrštenja:

$$\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} = \frac{l}{2}\sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2} \approx \frac{l}{2} + \frac{d^2}{4l}$$

i zanemarenja $d^2/4l$ prema $l/2$, dobiva se:

$$V_{\left(0,\frac{d}{2}\right)} = 2I_z \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln\left(\frac{l}{\frac{d^2}{4l}}\right) = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} \ln \frac{(2l)^2}{d^2} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} 2 \ln \frac{2l}{d} \tag{6.1–4}$$

Otpor uzemljenja uzemljivača u neograničenom homogenom tlu iznosi:

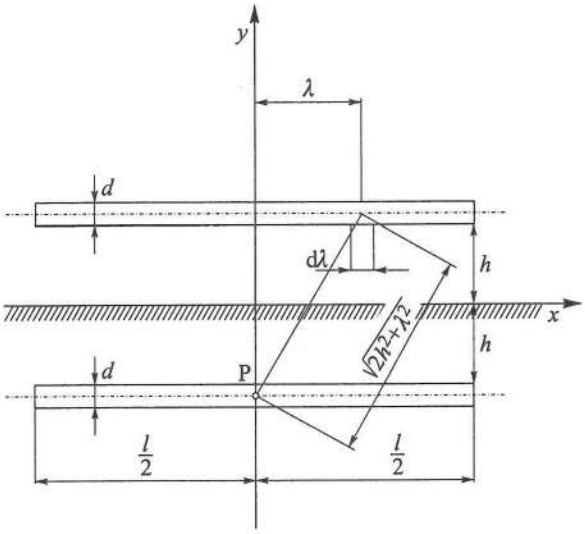
$$R_z' = \frac{V_0}{I_z} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} \tag{6.1–5}$$

Otpor uzemljenja uzemljivača ukopanog uz samu površinu zemlje iznosi:

$$R_z = 2R_z' = \frac{\rho_z}{\pi l} \ln \frac{2l}{d} \tag{6.1–6}$$

Ta je formula za izračun otpora uzemljenja trakastog uzemljivača položenog na površinu zemlje [24] na dubini $h = 0$.

U praksi se trakasti uzemljivači najčešće postavljaju ispod površine zemlje, na dubinu h, obvezatno ispod zone smrzavanja od oko 0,5 m. Da bi se odredio potencijal uzemljivača, treba pretpostaviti da postoji zrcalno postavljen uzemljivač i da je površina zemlje ravnina simetrije, slika 6.1–2.



Sl. 6.1–2. Trakasti uzemljivač ukopan u zemlju na dubinu h.

Izračunajmo potencijal točke P u sredini uzemljivača. Za to treba zbrojiti djelovanja struje u uzemljivaču i u njegovoj zrcalnoj slici. Potencijal, zbog struje u samom uzemljivaču određen je formulom (6.1–4), s tim da kroz uzemljivač ne teče struje $2I_z$, već struja I_z. Doprinos potencijala zbog djelovanja struje u elementu $\mathrm{d}\lambda$ zrcalne slike uzemljivača iznosi:

$$\mathrm{d}V = I_z \frac{\mathrm{d}\lambda}{l} \cdot \frac{\rho_z}{4\pi\sqrt{(2h)^2 + \lambda^2}} \tag{6.1–7}$$

Integriranjem po osi x u granicama od $-l/2$ do $+l/2$ dolazi se do potencijala točke P zbog struje u zrcalnoj slici uzemljivača. Zbrajanjem se dobiva potencijal točke P:

$$V_{(0,h)} = I_z \frac{\rho_z}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{(2h)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{(2h)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}}\right] \tag{6.1–8}$$

Otpor uzemljenja dobiva se dijeljenjem sa strujom I_z. Sastoji od dvaju članova: prvi je član jednak otporu R_z' (6.1–5), a drugi član predstavlja utjecaj ukopavanja uzemljivača. Pri određivanju otpora uzemljenja i u tom se slučaju može upotrijebiti dijagram na slici 5.1–2 s tim da je za trakasti uzemljivač faktor $m = 4h/l$, dok je za štapni uzemljivač $m = x/l$.

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}\right) \tag{6.1–9}$$

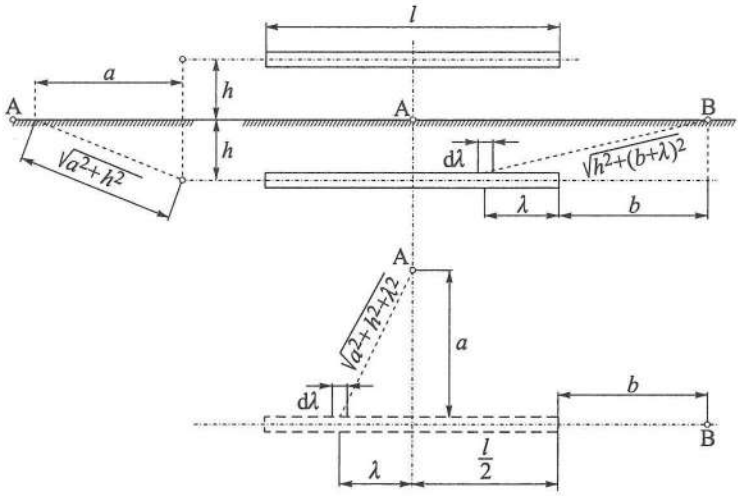
gdje je:

h dubina ukopa trakastog uzemljivača, m

l duljina trakastog uzemljivača, odnosno štapnog uzemljivača, m

x udaljenost od štapnog uzemljivača, m.

Da bi se odredio potencijal na površini zemlje, može se poći od slike 6.1–3. S pomoću nje se lako određuje potencijal na pravcu okomitom na uzemljivač i to upravo u njegovoj sredini (točka A) i potencijal u smjeru uzemljivača (točka B).



Sl. 6.1–3. Određivanje potencijala na površini zemlje na pravcu okomitom na uzemljivač u njegovoj sredini (točka A) i u smjeru uzemljivača (točka B).

U prvom slučaju – okomito na uzemljivač – potencijal površine zemlje određuje se kao zbroj djelovanja uzemljivača i njegove zrcalne slike, s tim da su ta dva djelovanja međusobno jednaka. Ako pretpostavimo da kroz svaki uzemljivač, stvarni i kroz njegovu zrcalnu sliku, teče struja I_z, djelovanjem struje u elementu $d\lambda$ nastaje potencijal:

$$dV = 2I_z \frac{d\lambda}{l} \frac{\rho}{4\pi\sqrt{a^2 + h^2 + \lambda^2}} \tag{6.1–10}$$

Integriranjem u granicama od $-l/2$ do $+l/2$ dobiva se potencijal na pravcu okomitom na uzemljivač:

$$V_{ok} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}} \tag{6.1–11}$$

gdje je:

a udaljenost od sredine trake u okomitom smjeru od uzemljivača, m.

I ovaj se izraz može odrediti uporabom dijagrama na slici 5.2–2, ako se za m stavi:

$$m = 2\frac{\sqrt{a^2 + h^2}}{l} \tag{6.1–12}$$

U drugom slučaju – u smjeru uzemljivača – djelovanjem struje u elementu $d\lambda$ nastaje potencijal:

$$dV = 2I_z \frac{d\lambda}{l} \cdot \frac{\rho_z}{4\pi\sqrt{h^2 + (b + \lambda)^2}} \tag{6.1–13}$$

pa se nakon integriranja u granicama od 0 do l dobiva:

$$V_{pr} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{h^2 + (b + l)^2} + b + l}{\sqrt{h^2 + b^2} + b} \tag{6.1–14}$$

gdje je:

V_{pr} potencijal u smjeru uzemljivača u nekoj točki na površini tla,

b udaljenost od kraja trakastog uzemljivača u uzdužnom smjeru uzemljivača, m. Za udaljenost ka spoljašnosti predznak za b je pozitivan (+) a za udaljenost ka unutrašnjosti predznak za b je negativan.

6.2. OTPOR UZEMLJENJA

Otpor uzemljenja trakastog uzemljivača duljine l, promjera d, položenog u dubinu h, ako je $l \gg h$, iznosi:

$$R_z = \frac{K_k \rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{l}{2h}\right) \tag{6.2–1}$$

Kod trakastih uzemljivača, prema [2] i [24], uzima se ekvivalentni promjer d u iznosu 1/2 širine trake.

K_k je, prema [2], korekcijski faktor i iznosi od 1 do 1,5. Taj korekcijski faktor utječe na veličinu otpora uzemljenja R_z što je razumljivo kad se zna da se ljeti slojevi zemlje mogu osušiti, a zimi smrznuti. Zbog tih se promjena mora računati s otporom uzemljenja većim nego u normalnim prilikama.

Iz (6.2–1) dalje se može zaključiti da se s povećanjem duljine l otpor uzemljenja bitno smanjuje, pa se zbog toga, već prema prilikama, odabire potrebna duljina trake. Dubina ukopa h, naprotiv, ne utječe bitno na smanjenje otpora uzemljenja, posebno ako je uzemljivač dug i ako je zemlja homogena. Čak i za vrijeme velikih suša vlažnost je zemlje na dubini od 1 m tolika da se otpornost tla znatnije ne mijenja. Osim toga, analizirajući raspodjelu napona oko nekog uzemljivača, lako je utvrditi da se povećanjem dubine ukopa povećava napon dodira jer na većem sloju zemlje nastaje veća razlika napona između uzemljivača i površine tla gdje su čovjekove noge. Da bi se to izbjeglo, valjalo bi onda, naprotiv, uzemljivače ukopati što pliće u zemlju, ali zemlja se uz površinu brzo suši, što bi opet stvaralo teškoće. Također treba imati u vidu i zonu smrzavanja tla (u kontinentalnim uvjetima) dubine oko 0,5 m čime se određuje dubina ukopa od 0,5 m do 1 m. Zato da bismo sve te složene i suprotne okolnosti najbolje uskladili, u praksi se kompromisno odlučujemo za dubinu ukopa između 0,5 i 1 m.

Kad se uzmu u obzir sva razmatranja, može se izraz (6.2–1) za praksu pojednostavniti tako da se zanemari utjecaj dubine ukopa, jer se ona u izvedbi ne mijenja. Pretpostavljajući, pak, da se zemlja na dubini od 0,5 do 1 m može ljeti osušiti, a zimi smrznuti, uzima se korekcijski faktor $K_k = 1{,}5$.

Za uzemljivače koji nisu okruglog presjeka, kao primjerice trakasti uzemljivač, potrebno je izračunati nadomjesni promjer iz površine P presjeka uzemljivača:

$$d = \sqrt{\frac{4P}{\pi}} \tag{6.2–2}$$

U [4] također se potvrđuje formula (6.2–1) za izračun otpora uzemljenja trakastog uzemljivača položenog u dubini h uzimajući da je nadomjesni promjer d jednak polovici širine trake a, pod uvjetom da je dubina ukopa:

$$h \geq \frac{3a}{2}, \quad h \geq 3d \tag{6.2–3}$$

Tako za traku 25 × 4 mm najmanja dubina ukopa iznosi:

$$h \geq \frac{3 \times 25}{2} = 37{,}5 \text{ mm} \approx 4 \text{ cm}$$

Dakle, kod polaganja trakastog uzemljivača na površinu zemlje treba uzeti nadomjesni promjer d po formuli (6.2–2), a za polaganje trakastog uzemljivača u dubinu $h \geq 3a/2$ treba uzeti da je promjer d jednak polovici širine trake, tj. $d = a/2$.

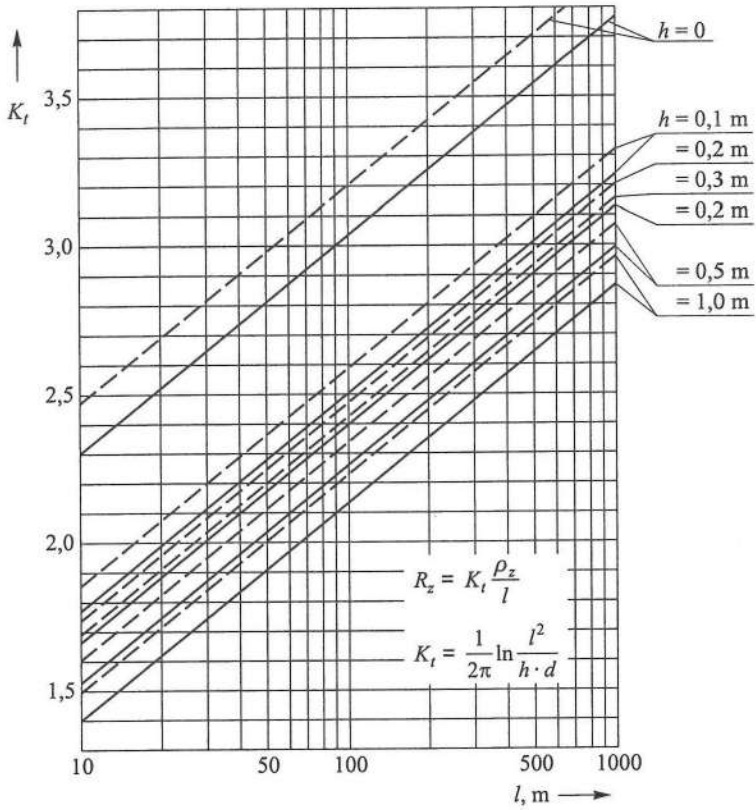
Ovim se također može definirati površinski trakasti uzemljivač, gdje je dubina polaganja $h < 3d$, odnosno za trakasti plosnati uzemljivač $h < 3a/2$ i za koji se otpor trakastog uzemljenja računa po formuli (6.1–6). Za trakasti dubinski uzemljivač u dubini h otpor uzemljenja računa se po formuli (6.2–1) ili po drugim formulama u kojima je faktor h.

Otpor trakastog uzemljivača prema [24] može se računati uporabom formula:

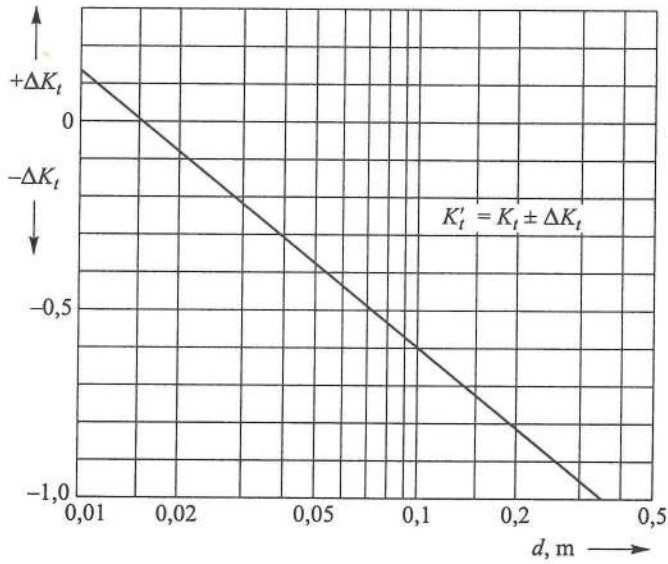
$$R_z = K_t \cdot \frac{\rho_z}{l} \tag{6.2–4}$$

$$K_t = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{l^2}{hd} \tag{6.2–5}$$

i dijagrama na slikama 6.2–1 i 6.2–2 za očitanje $K_t = f(l)$ i $K_t = f(d)$.



Sl. 6.2–1. Faktor K_t za trakasti uzemljivač promjera $d = 0{,}015$ m i za traku širine 30 mm (puna crta), te za uže presjeka 50 mm^2 i promjera $d = 0{,}009$ m (crtkana crta).



Sl. 6.2–2. Korekcija ΔK_t faktora K_t prema slici 6.2–1 u ovisnosti o nadomjesnom promjeru d.

Faktor K_t iz dijagrama na slici 6.2–1 odnosi se na trakasti uzemljivač širine $a = 30$ mm ili promjera $d = 15$ mm, i na trakasti uzemljivač od užeta presjeka 50 mm^2, ili promjera $d = 9$ mm. Za druge širine a i promjere traka treba očitati korekciju $+\Delta K_t$ ili $-\Delta K_t$ te izvršiti korekciju faktora K_t po formuli: $K_t' = K_t \pm \Delta K_t$ i tako izračunani K_t' uvrstiti u formulu (6.2–4) umjesto faktora K_t.

6.3. RASPODJELA POTENCIJALA

Raspodjela potencijala (naponski lijevak) trakastog uzemljivača u okomitom (poprečnom) smjeru na trasu trakastog uzemljivača, prema (6.1–11), iznosi:

$$V_{ok} = \frac{I_z \rho_z}{l} \alpha \tag{6.3–1}$$

$$\alpha = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}} \tag{6.3–2}$$

gdje je:

a udaljenost od sredine trakastog uzemljivača u okomitom smjeru na trasu trakastog uzemljivača.

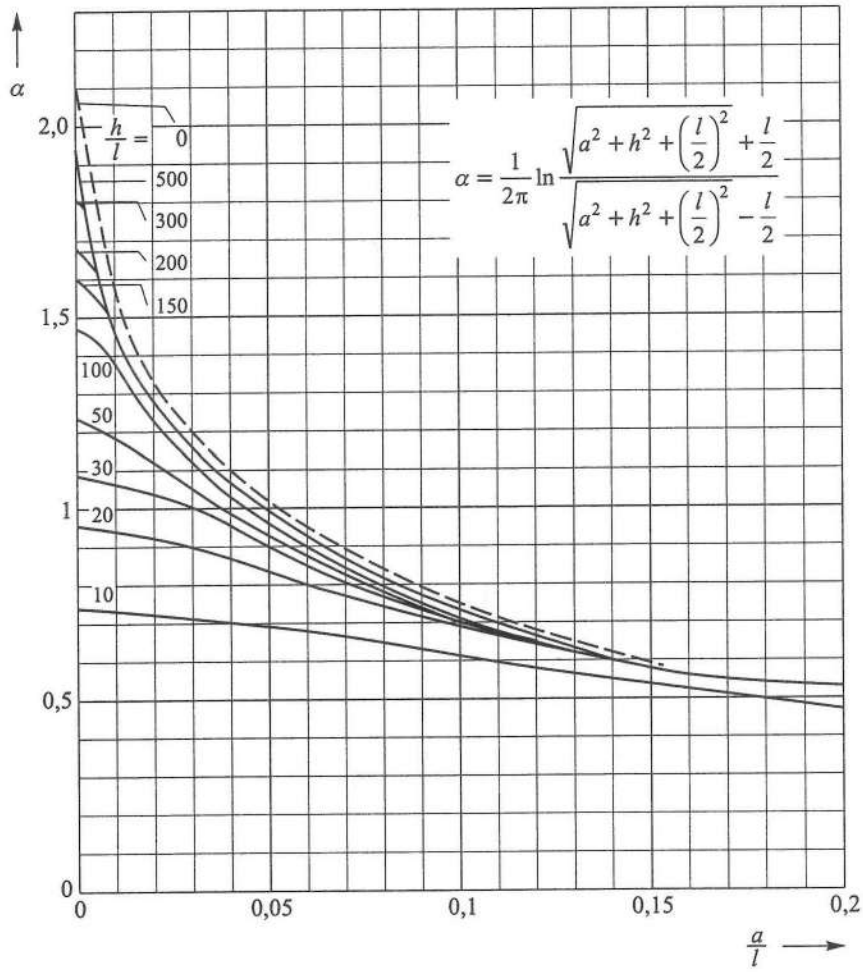
Vrijednost faktora $\alpha = f(a/l)$ očitava se iz dijagrama na slikama 6.3–1 i 6.3–2.

Relativni napon tla iznosi:

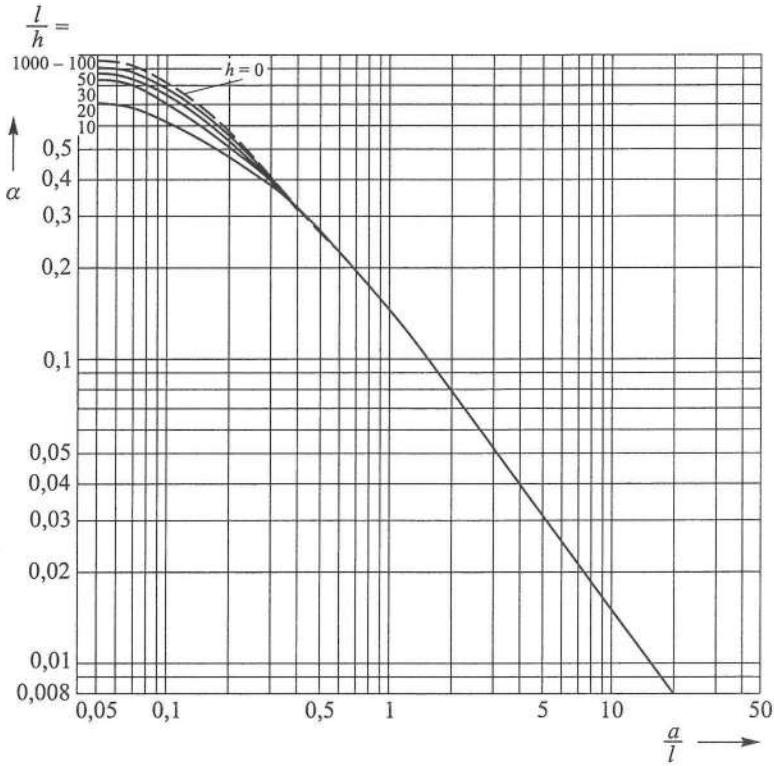
$$u_x = \frac{V_{ok}}{V_0} = \frac{\alpha}{K_t} \tag{6.3–3}$$

gdje je:

$$V_0 = I_z R_z, \quad R_z = K_t \frac{\rho_z}{l}$$



Sl. 6.3–1. Vrijednost faktora α za proračun naponskog lijevka trakastog uzemljivača u okomitom smjeru u ovisnosti o relativnoj udaljenosti a/l i o relativnoj dubini ukopa h/l. Krivulja je 0 za traku položenu na površini zemlje ($h = 0$). Krivulja $1/500 = 500$ odgovara za $h = 1$ m i $l = 500$ m, a na slici su označeni brojevi krivulje.



Sl. 6.3–2. Vrijednost faktora α za proračun naponskog lijevka trakastog uzemljivača u okomitom smjeru u ovisnosti o relativnoj udaljenosti i o relativnoj dubini ukopa h/l. Krivulja je 0 za traku položenu na površini zemlje ($h = 0$). Za druge relativne dubine ukopa označeni su brojevi krivulja.

Raspodjela potencijala (naponski lijevak) trakastog uzemljivača u pravcu trakastog uzemljivača, prema (6.1–14), iznosi:

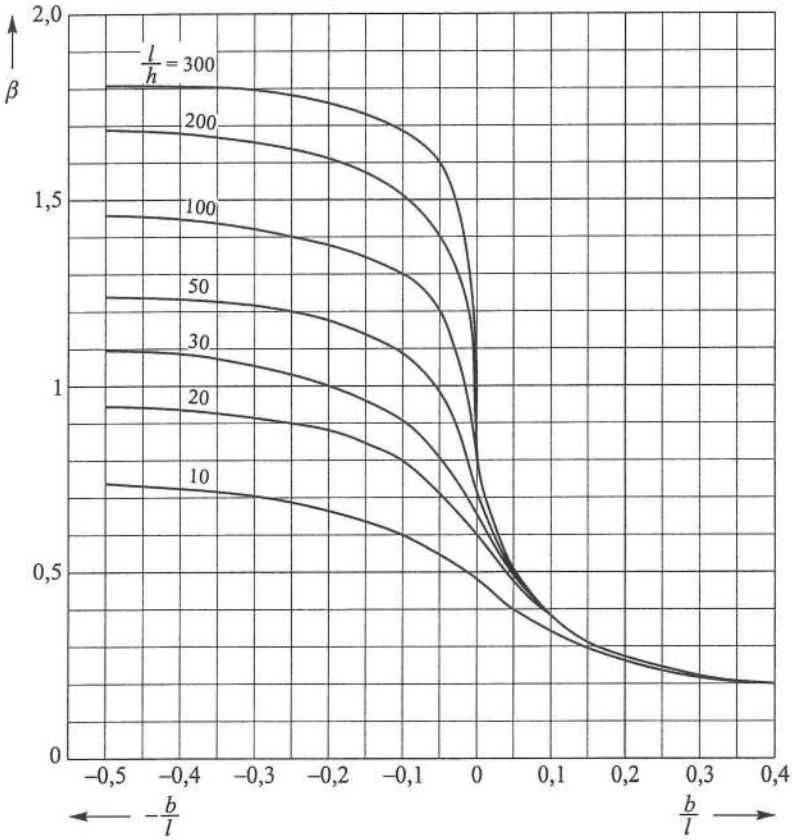
$$V_{pr} = \frac{I_z \rho_z}{l} \beta \tag{6.3–4}$$

gdje je:

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{h^2 + (l+b)^2} + l + b}{\sqrt{h^2 + b^2} + b}$$

b udaljenost od kraja vodiča (uzemljivača) u uzdužnom smjeru (prema van je pozitivna, a prema unutar negativna)

Vrijednost faktora $\beta = f(b/l)$ očitava se iz dijagrama na slici 6.3–3.



Sl. 6.3–3. Vrijednost faktora β za proračun naponskog lijevka trakastog uzemljivača u uzdužnom smjeru u ovisnosti od relativne udaljenosti b/l za relativne dubine ukopa h/l. Krivulja br. 300 odgovara relativnoj dubini ukopa $h/l = 1/300$.

Relativni napon tla iznosi:

$$u_x = \frac{V_{pr}}{V_0} = \frac{\beta}{K_t} \tag{6.3–5}$$

gdje je:

$$V_0 = I_z R_z, \quad R_z = K_t \frac{\rho_z}{l}$$

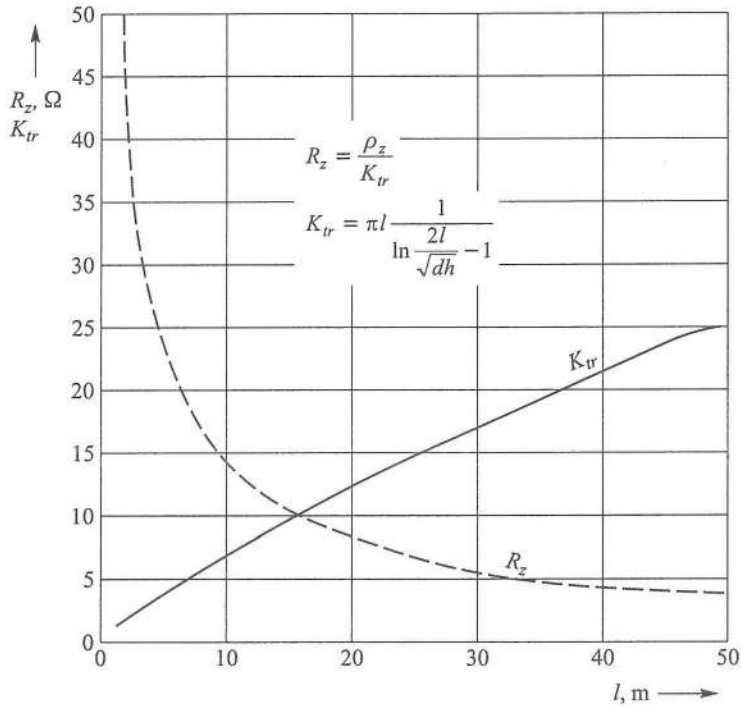
Otpor uzemljenja R_z trakastog uzemljivača od okruglog željeza promjera 10 mm i ukopanog u dubinu 0,5 m u tlo otpornosti 100 Ωm, prema [35], može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{K_{tr}}, \quad K_{tr} = \pi l \left(\frac{1}{\ln \frac{2l}{\sqrt{dh}} - 1} \right) \tag{6.3–6}$$

gdje je:

R_z otpor uzemljenja u zemlji otpornosti, 100 Ωm
K_{tr} faktor za nadomjesnu duljinu uzemljivača
l duljina uzemljivača, m
h dubina ukopa trakastog uzemljivača, m

Vrijednost faktora K_{tr} očitava se iz dijagrama na slici 6.3–4.



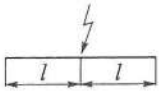
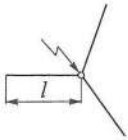
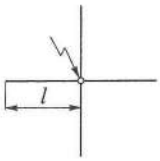
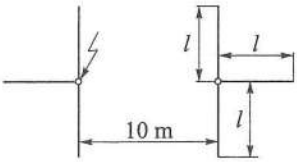
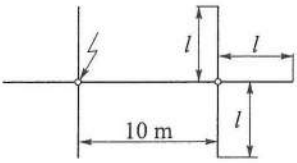
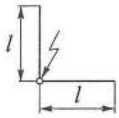
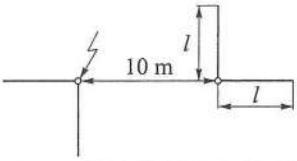
Sl. 6.3–4. Otpor uzemljenja R_z i faktor K_{tr} u ovisnosti o duljini uzemljivača (okruglo željezo promjera 10 mm, dubina ukopa 0,5 m i otpornost tla ρ_z = 100 Ωm).

6.4. KOEFICIJENTI ISKORIŠTENJA SLOŽENIH TRAKASTIH UZEMLJIVAČA

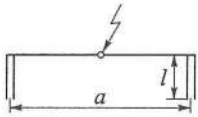
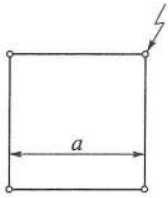
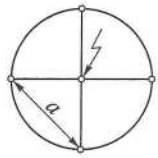
Izračunane vrijednosti otpora uzemljenja R_{zr} treba pomnožiti s koeficijentom η za struje tehničke frekvencije (50 Hz), odnosno koeficijentom η_i za struje munje, da bi se dobio stvarni otpor uzemljenja, R_z za struje tehničke frekvencije i R_{zi} za struje munje kao impulsni otpor uzemljenja:

$$R_z = R_{zr} \cdot \eta$$
$$R_{zi} = R_{zr} \cdot \eta_i \qquad (6.4\text{–}1)$$

Tablica 6.4–1. Koeficijenti iskorištenja η i η_i trakastih i štapnih uzemljivača za struje frekvencije 50 Hz i za struje munje [23].

Trakasti uzemljivači	Duljina kraka l, m	Koeficijent iskorištenja	
		η za struje frekvencije 50 Hz	η_i za impulsne struje munje
		1	1
	10 20 40	0,9 0,93 0,95	0,8 0,83 0,85
	10 20 40	0,75 0,8 0,85	0,65 0,7 0,75
	10 20 40	0,9 0,9 0,9	0,8 0,8 0,8
	10 20 40	0,8 0,83 0,85	0,7 0,73 0,75
	10 20 40	0,93 0,93 0,95	0,83 0,83 0,83
	10 20 40	0,9 0,9 0,9	0,8 0,8 0,8

Tablica 6.4–1. – Nastavak.

Štapni uzemljivač u kombinaciji s trakastim uzemljivačem	$\frac{a}{l}$	Broj štapnih uzemljivača	Koeficijent iskorištenja	
			η za struje frekvencije 50 Hz	η_i za impulsne struje munje
	2	2	0,9	0,8
	3	2	0,95	0,85
	2	3	0,85	0,75
	3	3	0,9	0,8
	2	4	0,75	0,65
	3	4	0,8	0,7
	2	3	0,8	0,7
	3	3	0,85	0,75
	2	4	0,75	0,65
	3	4	0,8	0,7

U tablici 6.4–1 (nastavak) dani su koeficijenti iskorištenja štapnih uzemljivača u kombinaciji s trakastim uzemljivačima razmaka a/l za struje tehničke frekvencije (50 Hz) η i za impulsne struje munje η_i.

Primjer 6A

Izračunajte otpor uzemljenja trakastog uzemljivača od pocinčane željezne trake 25 × 4 mm za sljedeće podatke:

- otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- dubina ukopa $h = 0$ m (površinski uzemljivač)
- dubina ukopa $h = 0{,}04$ m (najmanja dubina ukopa za koju se može računati dubinski trakasti uzemljivač)
- dubina ukopa $h = 0{,}5$, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1 i 1,5 m, (dubine ukopa koje su uobičajene u praksi)
- duljina $l = 25$, 50 i 100 m
- otpor uzemljenja treba izračunati po formulama (6.1–9), (6.2–1), (6.2–4) i (6.1–6) te grafičkom metodom uporabom dijagrama na slikama 6.2–2 i 6.2–3
- u izračunu računat će se s promjerom $d = a/2 = 0{,}0125$ m, a ne s ekvivalentnim promjerom:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 100}{\pi}} = 11{,}3\,\text{mm} = 0{,}0113\,\text{m}$$

Tablica 6.4–2. Izračun otpora uzemljenja trakastog uzemljivača za različite dubine ukopa h i duljine l pri otpornosti tla $\rho_z = 100\ \Omega$m.

$R_z = f(l, h)$ trakastog uzemljivača, Ω										
	Duljina l, m	Dubina ukopa h, m								
		0	0,04	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5
R_{zA}	25	–	8,938	7,330	7,215	7,115	7,033	6,958	6,892	6,639
R_{zB}		–	8,937	7,329	7,213	7,115	7,030	6,955	6,888	6,630
R_{zC}		–	8,937	7,329	7,213	7,115	7,030	6,955	6,888	6,630
R_{zD}		–	9,400	7,880	7,680	7,400	7,200	7,100	7,000	–
R_{zE}		10,560	–	–	–	–	–	–	–	–
R_{zF}										9,200
R_{zA}	50	–	4,910	4,106	4,048	3,999	3,957	3,919	3,886	3,757
R_{zB}		–	4,910	4,106	4,048	3,999	3,956	3,919	3,885	3,756
R_{zC}		–	4,910	4,106	4,048	3,999	3,956	3,919	3,885	3,756
R_{zD}		–	5,300	4,160	4,100	4,080	4,020	4,000	3,920	–
R_{zE}		5,721	–	–	–	–	–	–	–	–
R_{zF}										4,600
R_{zA}	100	–	2,619	2,274	2,245	2,220	2,199	2,180	2,163	2,099
R_{zB}		–	2,676	2,274	2,245	2,220	2,199	2,180	2,163	2,099
R_{zC}		–	2,676	2,274	2,245	2,220	2,199	2,180	2,163	2,099
R_{zD}		–	2,750	2,300	2,270	2,235	2,220	2,200	2,218	–
R_{zE}		3,081	–	–	–	–	–	–	–	–
R_{zF}										2,300

$$R_{zA} = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}\right)\right], \quad m = \frac{4h}{l}, \quad \text{formula } (6.1-9)$$

$$R_{zB} = \frac{K_k \rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{l}{2h}\right), \quad K_k = 1, \quad \text{formula } (6.2-1)$$

$$R_{zC} = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{dh}, \quad \text{formula } (6.2-4)$$

$$R_{zD} = \frac{\rho_z}{l}K_t, \quad K_t = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{l^2}{dh} \quad \text{formula } (6.5-6) \text{ i dijagram v. sl. } 6.3-2 \text{ i } 6.3-3$$

$$R_{zE} = \frac{\rho_z}{\pi l}\ln\frac{2l}{d} \quad \text{površinski uzemljivač, formula } (6.1-6)$$

$$R_{zF} \approx 2{,}3\frac{\rho_z}{l} \quad \text{za približni izračun otpora uzemljenja}$$

U tablici 6.4–2 dani su podaci izračuna otpora uzemljenja trakastog uzemljivača po navedenim formulama i za različite dubine ukopa h i duljine l, pri otpornosti tla. Iz tablice se vidi da dubina ukopa neznatno utječe na otpor uzemljenja. Međutim, utjecaj dubine ukopa znatno je veći jer s dubinom ukopa opada otpornost tla i time otpor uzem-

ljenja. O tome treba voditi računa, posebno kada se polaže traka na manje dubine, od 0,5 do 1 m, gdje je isušivanje tla znatnije i time povećanje otpornosti tla. Osim toga se vidi da su neznatne razlike otpora uzemljenja izračunatog po formulama (6.1–9), (6.2–1) i (6.2–4), manje se razlike pojavljuju tek u trećoj i četvrtoj decimali, što se može zanemariti.

Ti zaključci nas upućuju na valjanost primjene jedne od triju navedenih formula (6.1–3), (6.2–1) i (6.2–4). Za izračun otpora uzemljenja za dubine ukopa do $h < 3d$ ili $h < 3a/2$ treba primijeniti formulu (6.1–6). Također se vidi da nije dobro računati ni približno otpor trakastog uzemljivača položenog u dubinu $h \geq 3d$ ili $h \leq 3a/2$ (dubinski uzemljivač) po formuli (6.1–6) jer se dobije znatno veći otpor uzemljenja, pa čak i od onog izračunanog po približnoj formuli $R_{zF} = 2{,}3\rho_z/l$.

Primjer 6B

Treba izračunati razdiobu potencijala trakastog uzemljivača u okomitom smjeru na trasu trakastog uzemljivača na udaljenosti od 1 m do 10 m točka A_{10} i na udaljenosti od 20 m točka A_{20} za sljedeće podatke:

- otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A
- dubina ukopavanja $h = 0$ m, 0,5 m i 1 m
- duljina $l = 25$ m, 50 m
- trakasti uzemljivač, željezna pocinčana traka 25 × 4 mm.

Razdioba potencijala na površini zemlje, u okomitom smjeru na trasu, izračunava se po formuli (6.3–2):

$$V_{ok} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{l}{2}}{\sqrt{a^2 + h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}}$$

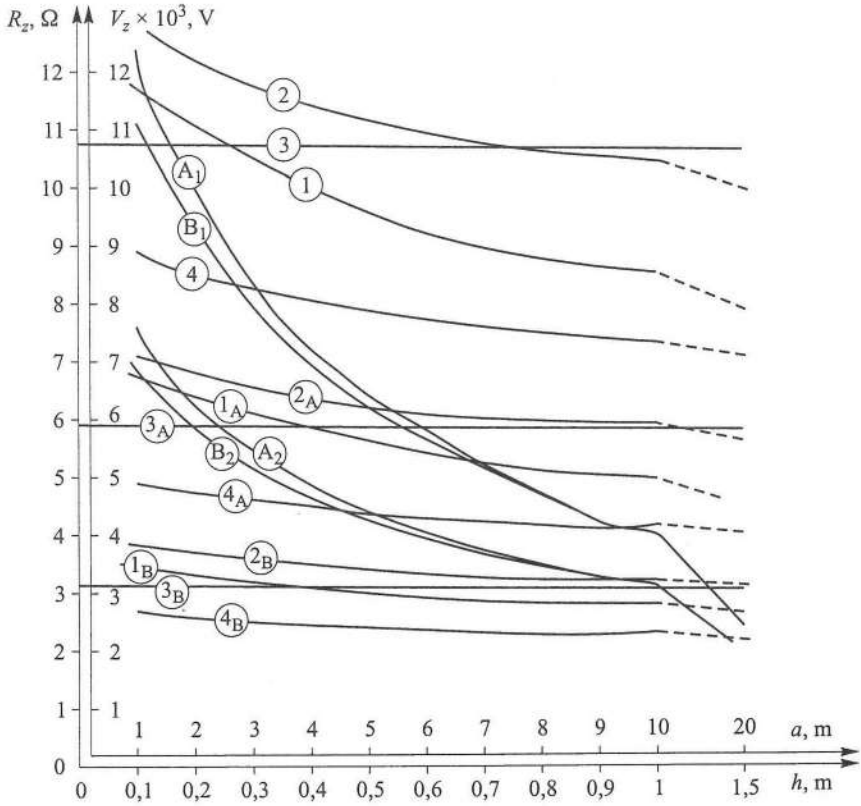
Računat ćemo potencijal u točkama razmaknutim po 1 m, od točke A_1 na udaljenosti 1 m do točke A_{10} i na udaljenosti 20 m u točki A_{20}.

Iz formule se vidi neznatna promjena potencijala, s promjenom dubine ukopa za uzemljivač na površini ($h = 0$ m) i na dubinama $h = 0{,}5$ m, $h = 1$ m. Također je evidentna, što se može i očekivati, znatna promjena potencijala s promjenom duljine uzemljivača od 25 m do 50 m. Najveće su razlike potencijala na udaljenosti od 1 m od trase. To je ustvari napon koraka ili dodira između točaka $A_0 - A_1$. Najmanja je razlika na najvećoj udaljenosti, a u tom primjeru $A_9 - A_{10}$. Razumljivo da je najveća strmina krivulje razdioba potencijala uz trasu i da se s udaljenošću smanjuje.

Na sl. 6.4–1 prikazan je dijagram raspodjele potencijala (krivulje A i B) za duljinu trakastog uzemljivača $l = 25$ m i $l = 50$ m, a za dubinu ukopa $h = 0$ m i $h = 1$ m i promjenu otpora uzemljenja trakastog uzemljivača u ovisnosti o dubini ukopa, a za duljine uzemljivača od 25, 50 i 100 m izračunan po formulama 1, 2, 3 i 4.

Tablica 6.4–3. Razdioba potencijala na površini zemlje u pravcu okomitom na uzemljivač u ovisnosti o dubini ukopa i za duljine trakastog uzemljivača od 25 i 50 m i za udaljenost u okomitom smjeru od A_1 do A_{20}.

	V_{ok}, V					
h, m	0	0	0,5	1,0	0,5	1,0
l, m	25	50	25	25	50	50
A_0	–	–	1499,47	1230,16	879,53	747,56
A_1	1230,13	747,56	1187,69	1098,38	725,93	681,10
A_2	967,18	615,06	955,77	925,18	609,29	593,83
A_3	815,27	538,01	810,20	795,74	535,41	528,02
A_4	710,02	483,59	706,61	698,42	482,13	477,87
A_5	629,20	441,64	627,44	622,26	440,71	437,97
A_6	565,43	407,63	564,25	560,73	406,99	405,09
A_7	513,17	379,14	512,34	509,82	378,67	377,28
A_8	469,42	354,71	468,80	466,94	354,35	353,30
A_9	432,20	333,41	431,74	430,31	333,13	332,31
A_{10}	400,15	314,60	399,79	398,68	314,38	313,72
A_{20}	225,42	200,08	225,36	225,17	200,03	199,89



Sl. 6.4.–1.

Krivulje 1, 2, 3 i 4 prikazuju otpor uzemljenja izračunan po formulama 1, 2, 3 i 4 za duljinu trokutastog uzemljivača od 25 m u ovisnosti o dubini ukopa od 0,1 do 1 m.

Krivulje 1_A, 2_A, 3_A i 4_A prikazuju otpor uzemljenja trakastog uzemljivača izračunan po formulama 1, 2, 3 i 4 za duljinu uzemljivača 50 m u ovisnosti o dubini ukopa od 0,1 do 1 m.

Krivulje 1_B, 2_B, 3_B i 4_B prikazuju otpor uzemljenja trakastog uzemljivača izračunan po formulama 1, 2, 3 i 4 za duljinu uzemljivača 100 m u ovisnosti o dubini ukopa od 0,1 do 1 m.

Krivulje A_1 i A_2 prikazuju razdiobu potencijala za dubinu trakastog uzemljivača 25 i 50 m i za $h = 0$ (površinski uzemljivač) u okomitom smjeru na uzemljivač od 1 do 10 m.

Krivulje B_1 i B_2 prikazuju razdiobu potencijala za dubinu ukopa $h = 1$ m, duljinu trakastog uzemljivača $l = 25$ m i 50 m u okomitom smjeru na uzemljivač, a za udaljenost od 1 do 10 m.

1. $$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{m^2+1}+1}{\sqrt{m^2+1}-1}\right), \quad \text{za m} = \frac{4h}{l}$$

2. $$R_z = \frac{K_k \rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{2l}{d} + \ln\frac{l}{2h}\right)$$

3. $$R_z = \frac{\rho_z}{\pi l}\ln\frac{2l}{d}$$

4. $$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{2l^2}{dh}$$

A. $V_z \rightarrow h = 0\,\text{m}, l = 25\,\text{m}, l = 50\,\text{m}$

B. $V_z \rightarrow h = 1\,\text{m}, l = 25\,\text{m}, l = 50\,\text{m}$

7. TEMELJNI UZEMLJIVAČI

7.1. PRIMJENA TEMELJNIH UZEMLJIVAČA KAO ZDRUŽENIH UZEMLJIVAČA

Temeljni uzemljivači ugrađuju se u betonske temelje objekta postavljanjem metalnih vodiča tako da preko velike površine betona dolaze u kontakt s okolnom zemljom. Zato se nazivaju temeljni uzemljivači.

Temeljni uzemljivači po svojoj su konstrukciji jednostavni i vrlo djelotvorni. Oni mogu poslužiti i kao zaštitni i kao gromobranski uzemljivači, tj. kao združeni uzemljivači. Velika prednost takvih uzemljivača sastoji se u tome što se nalaze u betonu, koji ih štiti od korozije, pa je njihovo vrijeme trajanja praktično neograničeno. Osim toga, budući da je beton pod zemljom uvijek vlažan, takav uzemljivač ima s tlom dobar dodir, i to na relativno velikoj površini. To sve skupa omogućuje postizanje manjeg otpora rasprostiranja, osobito u slabo vodljivoj zemlji.

Otpor uzemljenja temeljnih uzemljivača približno se izračunava s pomoću formule koja vrijedi za polukuglaste uzemljivače:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi d} \tag{7.1–1}$$

gdje je:

ρ_z otpornost tla, Ωm

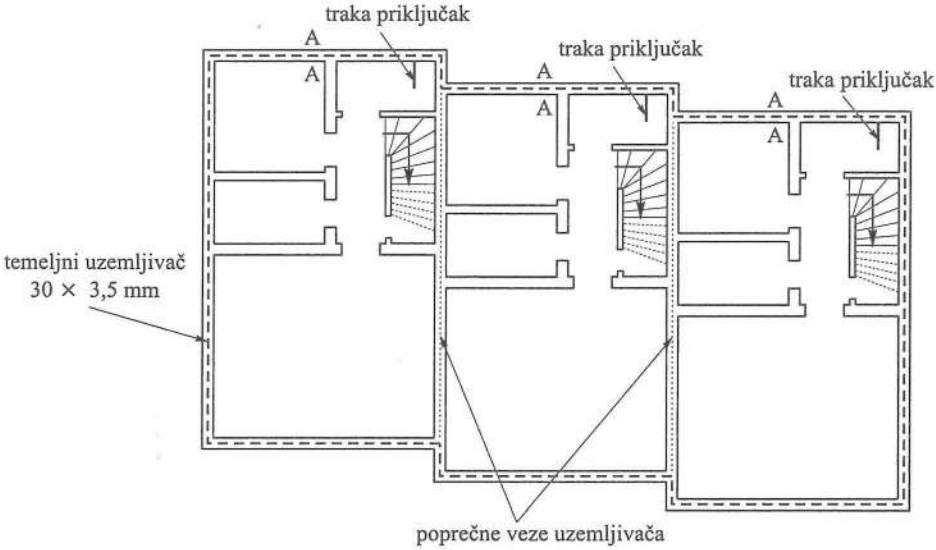
d promjer polukugle za koju zamišljamo da je jednakog obujma kao i betonski temelj u koji je ugrađen metalni vodič, kao temeljni uzemljivač, m

Promjer d računa se iz izraza:

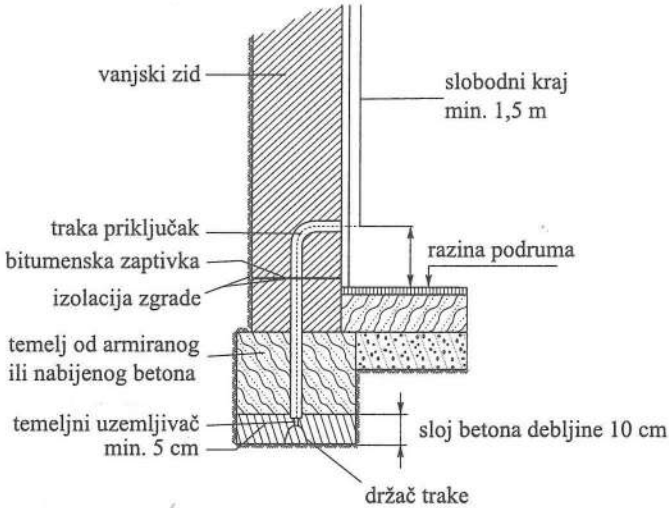
$$d = 1{,}57 \cdot \sqrt[3]{V_t}, \quad \text{m} \tag{7.1–2}$$

pri čemu je V_t obujam temelja u m^3.

Otpor uzemljenja takvih uzemljivača sastoji se od otpora betona i otpora slojeva zemlje koji obuhvaćaju betonski temelj. Daljnje prednosti tih uzemljivača osobito su izražene spajanjem svih metalnih instalacija i konstrukcija sa sustavom uzemljenja u svrhu izjednačavanja potencijala u samoj blizini objekta, što znači smanjenje opasnoga dodirnog napona i napona koraka. Budući da su uzemljivači ugrađeni u betonske temelje, na njihov otpor rasprostiranja ne djeluje mnogo sušenje i zamrzavanje zemlje ili bilo kakve druge vanjske klimatske promjene.



Sl. 7.1–1. Plan polaganja temeljnog uzemljivača u betonski temelj.



Sl. 7.1–2. Detalj polaganja temeljnog uzemljivača.

Temeljni uzemljivač [27] izvodi se od pocinčane čelične trake 25 × 4 mm, 30 × 3,5 mm ili od pocinčanog betonskog željeza ∅10 mm. Postavlja se na sloj betona debljine 10 cm, marke (obično) MB 20, tako da uzemljivač čini zatvoreni prsten, slike 7.1–1 i 7.1–2.

Temeljni uzemljivač spaja se sa željeznom armaturom armiranobetonske konstrukcije u temelju, u nosive stupove, a u pravilu na zadnjoj armiranobetonskoj ploči, polaganjem također temeljnog uzemljivača. Spajanje sa željeznom armaturom izvodi se odgovarajućim spojnicama ili zavarivanjem [12].

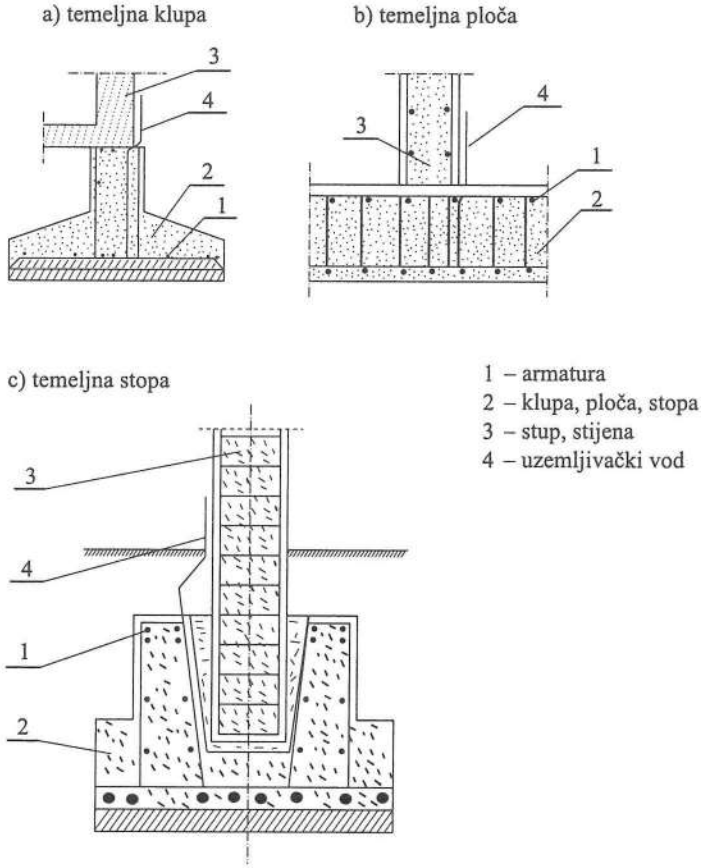
7.2. ARMIRANI TEMELJI KAO TEMELJNI UZEMLJIVAČI GROMOBRANSKE INSTALACIJE

Temeljni uzemljivači upotrebljavaju se u Poljskoj već više od 40 godina. U gromobransku zaštitu objekata formalno su uvedeni pri usklađivanju propisa 1972. godine za dva rješenja uzemljivača. Prvo rješenje, koje je do određene mjere slično rješenju u Njemačkoj [L8], temelji se na ulaganju metalne trake ili štapa u temeljni rov. Drugo se rješenje temelji na korištenju armiranobetonskih dijelova objekta ili tehnoloških instalacija pod zemljom. To rješenje dobiva sve veću važnost. Dodatne trake i štapovi ulažu se kada nedostaje armatura ili se ona iz bilo kojeg razloga ne može upotrijebiti.

Širenju ideje uporabe armiranobetonskih temelja u cilju uzemljivanja prethodila su svestrana laboratorijska ispitivanja i eksperimenti, kao i svladavanje niza popratnih problema. Sva svojstva tih uzemljivača još nisu ni detaljno proučena. Dobiveni su, međutim, već podaci o njihovoj učinkovitosti, trajnosti i stabilnosti, koji ukazuju na njihovu jasnu konkurentnost u odnosu na klasične uzemljivače.

7.2.1. Tipovi temelja

Ovisno o prostornim konstrukcijskim rješenjima postoje u praksi tri tipa armiranih temelja: *temeljna klupa*, *stopa* i *ploča* (blok). Temeljne klupe stvaraju mrežastu strukturu potpore stijene objekta, stope čine podlogu nosivih stupova industrijskih hala, a ploče daju površinsku (plošnu) strukturu temelja pod cijelim objektom ili ispod njegova većeg dijela. Na slici 7.2–1 prikazani su primjeri navedenih tipova temelja; prikazani su detalji temeljnog uzemljenja, način izvedbe i spajanje uzemljivača i armature za temeljnu klupu, temeljnu ploču i temeljnu stopu prema [12]. Izvedbe pojedinih tipova temelja glede formiranja betona i smještaja armature, zajedno s geološkim uvjetima i stanjem vanjske površine (izolacionog sloja protiv vlage) odlučuje o električnim svojstvima uzemljivača.



Sl. 7.2–1. Skica primjera presjeka tipova temelja i detalj polaganja temeljnog uzemljivača.

7.2.2. Otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača oblika temeljne stope ili klupe

Temeljni je uzemljivač objekta složeni sustav elemenata, vrlo složen s električnog stajališta i težak za određivanje računskih parametara. Unatoč tome bilo je pokušaja točnog računanja [L2, L8].

U takvoj situaciji najracionalnije je izračunati otpor uzemljenja temeljnih uzemljivača oblika temeljne stope ili klupe po približnim formulama (koje su za praktičnu uporabu, dovoljno točne):

$$R_z = \rho_z \cdot K_s \tag{7.2–1}$$

$$R_z = \rho_z \cdot K_{pt} \tag{7.2–2}$$

Na temelju analitičkih procjena korigiranih eksperimentalnim podacima može se uzeti da je za uzemljivače u obliku temeljne stope obujma V_t, faktor korekcije:

$$K_s = \frac{0{,}2}{\sqrt[3]{V_t}} \tag{7.2–3}$$

a za uzemljivače od temeljnih klupa i ploča površine S_t, faktor korekcije:

$$K_{pt} = \frac{(0{,}45 \ldots 0{,}6)}{\sqrt{S_t}} \tag{7.2–4}$$

Veće vrijednosti K_{pt} odgovaraju malim uzemljivačima (s jednom ili dvjema petljama), dok za prostranije i veće uzemljivače odgovaraju manje vrijednosti. Daljnje pojednostavnjenje koje čini koeficijent K_{pt} ovisi samo o obujmu ili površini što je zauzima uzemljivač daje podatke koji su prikazani u tablici 7.2–1. Prema tim podacima istovjetni temelji u istovjetnim geološkim uvjetima mogu imati različite vrijednosti izmjerene otpornosti [L9].

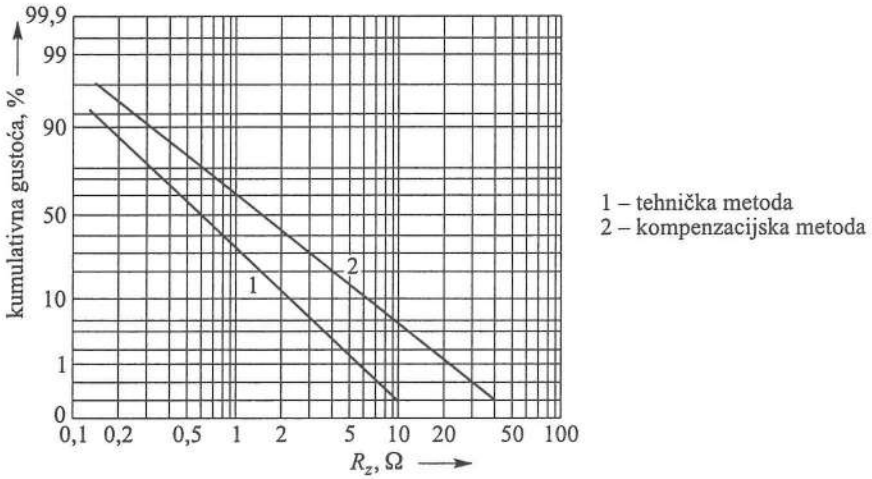
Tablica 7.2–1. Usporedba izračunatih i izmjerenih otpora uzemljenja temeljnih uzemljivača.

S_{temelja}, m^2	801	1230	953	1106
ρ_z, Ωm	100	15	23	288
$R_{z,\,\text{izmjeren}}$, Ω	2,6 ... 4,6	0,35 ... 2,6	0,55 ... 3,13	1,0 ... 6,4
$R_{z,\,\text{izračunat}}$, Ω	2,1	0,26	0,45	5,2

Iz tablice 7.2–1 vidimo veliko odstupanje izmjerenog otpora uzemljenja prema onom izračunanom kod temelja manje površine (u ovom primjeru $S_t = 801$ m^2), koje se kreće od 124 % do 219 %. Kod veće površine temelja i ρ_z (u ovom primjeru $S_t = 1106$ m^2, $\rho_z = 288$ Ωm) izmjerene vrijednosti u odnosu na izračunanu kreću se od 19 % do 123 %. Dakle, mnogo su povoljnije. Leydy i Wolkowinski [L9] tumače te razlike različitim utjecajem izolacije temelja protiv vlage, i smatraju da najveće razlike prouzrokuje nepovezanost armature te daju čak i utjecaj u statističkoj ocjeni koeficijenta K_{pt} i K_s.

Statistička mjerenja i na temelju frekvencije pojavljivanja različitih vrijednosti otpora uzemljenja stambenih blokova srednje veličine pokazuju da je njihova srednja vrijednost oko 0,6 Ω kod mjerenja tehničkom metodom (krivulja 1 na slici 7.2–2), i oko 1,3 Ω kod mjerenja kompenzacijskom metodom (krivulja 2 na slici 7.2–2). Ispravnost izvršene ocjene potvrđuju Feydtovi rezultati [L3]. On je analognim mjerenjima na različitim vrstama uzemljivača (klupe, stope i ploče) dobio vrijednosti između onih prikazanih krivuljama 1 i 2. Na 20 primjera samo je jedan objekt vrlo malih dimenzija (11,4 m^2) imao otpornost preko 7 Ω. Druga mjerenja u stambenim blokovima u varšavskim naseljima ni u jednom primjeru nisu dala veće otpornosti od 4 Ω.

Kod uzemljivača većih izmjera, mjerenje otpora uzemljenja tehničkom metodom mjerodavno je za procjenu udarnog otpora uzemljenja. Slika 7.2–2 pokazuje da u pretežnom broju slučajeva udarni otpor uzemljenja ne prelazi nekoliko ohma. Možemo se složiti s Prastovim mišljenjem [L10] da se temeljni uzemljivači mogu upotrebljavati za zaštitu od udara munje bez dokazivanja vrijednosti njihove otpornosti. Treba samo voditi brigu o izvedbi spojeva (povezivanju).



Sl. 7.2–2. Kumulativna gustoća pojavljivanja različitih vrijednosti otpora uzemljenja stambenih blokova.

Kao donekle zasebni problem pojavljuje se stabilnost otpora uzemljenja, kako sezonska tako i višegodišnja. Nakon otprilike 3 mjeseca od izvedbe temeljnog uzemljivača njegov se otpor stabilizira. To se povezuje s promjenom njegove strukture za vrijeme vezanja kao i s činjenicom da otpornost u tlo uronjenog betona postiže s vremenom najmanju vrijednost (najčešće 40...50 Ωm, rijetko 200...300 Ωm), neovisno o stupnju vlage tla. Rezultati mjerenja gotovo su neovisni o promjenama otpornosti tla, koje se kreće u širokim granicama. Kao povoljni čimbenik može se uzeti u obzir i razmak između armature i tla, ispunjen betonskom masom, što smanjuje gustoću struje u tlu. Prema [L5] otpornost betona raste s njegovim starenjem. Zato treba smatrati da će otpor uzemljenja rasti.

Važan je čimbenik, koji utječe na otpor uzemljenja izolacija temelja protiv vlage. Najčešće su temelji jednostruko ili višestruko premazani različitim sredstvima iz skupine abizola, čija srednja statistička čvrstoća na električni proboj iznosi od 1,4 do 4,8 kV [L1]. Udarni napon munje tu izolaciju s lakoćom probije. U slučaju struja kratkog spoja ta izolacija može u početnom vremenu dovesti do porasta otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača, ali nakon polaganja temelja u tlo kroz nekoliko tjedana padne na prihvatljivo malu vrijednost.

7.3. PROMJENE OTPORA UZEMLJENJA TEMELJNOG UZEMLJIVAČA TIJEKOM EKSPLOATACIJE

Prema Fritschovim [L5] istraživanjima najveći porast otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača treba očekivati u prvom desetljeću eksploatacije. U [12] provedena su mjerenja otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača za objekte različitih površina temeljnog uzemljivača S_t, za različite otpornosti tla ρ_z i za vrijeme eksploatacije od 1 do 14 godina. Rezultati su dani u tablici 7.2–2. Iz izmjerenih otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača R_z vidi se velika promjena otpora tijekom eksploatacije, ali se ne može uspostaviti zakonitost $R_z = f(t)$.

Omjer $R_{z,\text{izmjereno}}/R_{z,\text{izračunato}}$ iznosi i do 30,52.

Tablica 7.2–2. Promjena otpora temeljnog uzemljivača za razdoblje eksploatacije od 14 godina za razne površine objekata te razmjerje izmjerenog i izračunatog otpora temeljnog uzemljivača.

Vrijeme eksploatacije, godina	1	1	2	3	4	5	6	9	10	12	13	14
Površina objekta temeljnog uzemljivača S_t, m²	672	400	448	462	1325	484	630	953	674	798	667	445
ρ_z, Ωm	61	61	30	16	28	23	23	23	21	21	23	23
$R_{z,\text{izmjeren}}$, Ω	1,4	4,5	1,2	2,9	1	3,2	5,1	11,5	6,5	11,2	16,3	9
$R_{z,\text{izračunan}}$, Ω	1,41	1,83	0,85	0,45	0,46	0,63	0,55	0,45	0,49	0,45	0,53	0,65
$\frac{R_{z,\text{izmjeren}}}{R_{z,\text{izračunan}}}$	0,99	2,46	1,41	6,49	2,17	5,1	9,27	25,7	13,4	25,1	30,5	13,8

Još su pesimističkija Vorgušicova [34] istraživanja. On je utvrdio da se otpor betona tijekom dvije godine eksploatacije promijeni od 30 do 50 puta. Tu treba napomenuti da se ti podaci odnose na beton, ali ne na armirani beton, i da nisu navedeni uvjeti pod kojima su izvedena navedena ispitivanja.

Iz tablice 7.2–2 može se zaključiti da je do 5 godina eksploatacije blaži porast, a nakon 5 do 14 godina veći porast otpora uzemljenja.

Za trakaste uzemljivače u poglavlju 6.3 navedeni su razlozi primjene korekcijskog faktora povećanja otpora uzemljenja tijekom eksploatacije u granicama od 1 do 1,5. Kako nema podataka koliko bi trebalo povećati izračunani otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača u određenim vremenskim intervalima eksploatacije objekta, može se reći da je preporučljivo (što je mišljenje autora) primijeniti sljedeće faktore korekcije:

– do 5 godina eksploatacije objekta: $K_{tuz} \approx 2$,
– iznad 5 godina eksploatacije objekta: $K_{tuz} \approx 10$.

Međutim, i tako visoki korekcijski faktor K_{tuz} ne bi trebao postavljati zapreku za sve veću primjenu temeljnih uzemljivača, jer su obujam i površina temeljnih uzemljivača

veliki, te je izračunani otpor uzemljenja mali, recimo < 1 Ω, pa i primjena faktora korekcije od 10, daje otpor uzemljenja od 10 Ω što nije previše ni za gromobranski ni za združeni uzemljivač. Pored toga, ako bismo primijenili i manji faktor korekcije, te npr. nakon 10 godina eksploatacije, mjerenjem zaključili da otpor uzemljenja ne zadovoljava, mogli bismo dodavanjem trakastih ili štapnih uzemljivača na sustav temeljnog uzemljivača smanjiti otpor uzemljenja na željenu vrijednost.

Uvođenjem faktora korekcije otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača K_{tuz} formule za izračun otpora uzemljenja (7.1–1), (7.2–1) i (7.2–2) poprimaju konačan oblik:

$$R_z = K_{tuz} \frac{\rho_z}{\pi d} \tag{7.2–5}$$

$$R_z = K_{tuz} \cdot \rho_z \cdot K_s \tag{7.2–6}$$

$$R_z = K_{tuz} \cdot \rho_z \cdot K_{pt} \tag{7.2–7}$$

7.4. NAPON KORAKA I DODIRNI NAPON

Male vrijednosti otpora uzemljenja temeljnih uzemljivača pogoduju ograničenju potencijala uzemljivača, kao i dodirnog napona i napona koraka.

Veliki presjeci armature u usporedbi s dimenzijama klasičnih uzemljivača i njihova udaljenost od mjesta dostupnih čovjeku pogoduju ograničenju udarnog napona. Iz usporedbe podataka u [L8], kao i izvršenih laboratorijskih ispitivanja, temeljni uzemljivači daju manji napon koraka i dodirni napon u usporedbi s klasičnim uzemljivačima.

7.5. UGROŽENOST TEMELJNOG UZEMLJIVAČA

Temelj, kao uzemljivač, izložen je termičkim, dinamičkim i elektrokemičkim djelovanjima zbog prolaza struje munje. Iz eksperimentalnih podataka [L7] poznato je da dopuštena gustoća udarne struje na površini armature u tlo zakopanog temelja nije manja od 3 A/cm^2. To u praksi znači da površina koja odgovara jednoj stopi ili jednom metru temeljne klupe od oko 2,4 × 10^3 cm^2 do iznad 5,2 × 10^3 cm^2 može odvesti udarnu struju od nekoliko desetaka kiloampera. Prekoračenje te veličine malo je vjerojatno.

Struja munje ne ugrožava armaturu ni termički (s obzirom na njezin znatan presjek) ni elektrokemijski (s obzirom na kratko vrijeme prolaza). U najnepovoljnijim uvjetima prolaza struje temperatura armature može porasti jedva nekoliko Celziusovih stupnjeva, a za nagrizanje sloja čelika debljine 0,1 mm struja gustoće 3 A/cm^2 trebala bi prolaziti 2,7 sata. Veću koroziju može prouzročiti djelovanje elektrokemijskih potencijala.

Primjer 7A

Potrebno je izračunati otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača za betonski temelj zgrade sa slike 7.1–1 (M 1 : 100), za otpornost tla 60 Ωm. Dubina je betonskog temelja 1 m, a širina 0,4 m.

Ukupna je duljina betonskog temelja 6 × 4 + 4 × 7 = 52 m, za dubinu temelja od 1,5 m i širinu 0,4 m obujam je temelja: $V = 52 \times 0{,}4 \times 1{,}5 = 31{,}20\ \text{m}^3$. Prema tome, promjer nadomjesnog polukuglastog uzemljivača iznosi:

$$d = 1{,}57\sqrt[3]{V_t} = 1{,}57\sqrt[3]{31{,}20} = 4{,}943\ \text{m}$$

Otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača iznosi:

$$R_z' = \frac{\rho_z}{\pi d} = \frac{60}{\pi \cdot 4{,}943} = 3{,}9\ \Omega$$

Primjena faktora korekcije zbog povećanja otpora uzemljenja tijekom eksploatacije objekta, recimo $K_{tuz} = 4$, povećava otpor uzemljenja na:

$$R_z' = K_{tuz} \cdot R_z = 4 \cdot 3{,}9 = 15{,}6\ \Omega$$

Literatura

[L1] Anderson, E., Kosztaluk, R.: *Powloki elektroizolacyjne do ochrony od porazen*, Buil. Instyt. Energetyki, Nr. 5/6, 1974, s. 43–45.

[L2] Feist, K. H.: *Optimale Bemessung von Erdungsalngen*, ETZ, A 87, 11. 1966, s. 876–880.

[L3] Feydt, M., Jagnow, A., Odtze, K.: *Natürliche Fundamenterder für Wohn – Gesselschafts – und Industrievauten*, Der Elektro – Praktiker, 23/1969/8, s. 257–260

[L4] Flisowski, Z., Loboda, M.: *Badania elektrycznych wlasnosci udarowych otuliny betonowej konstrukcji zelbetiwych*, Pregl. Elektrotechn., Nr. 12, 1976, s. 468–470.

[L5] Fritsh, V.: *Der Ausbreitungswiderstand von Betonerdern E und M*, Nr. 8, 1971.

[L6] Kosztaluk, R.: *Wykorzystanie zbrojonych fundamentow betonowych do uziemienia linii 110 kV i 220 kV*, Energetyka, Nr. 4., 1959.

[L7] Kosztaluk, R.: *Zjawiska w betonie i gruncie wywotane przeptywem pradow piorunowych i zwarciowych przez fundamenty linii przesylowych*, Arch. Elektrotechniki, Nr. 1, 1976, s. 95–108.

[L8] Kuhnert, E.: *Fundamenterder*, Bull. SEV 62/1971/17, s. 817–853.

[L9] Leydy, B., Wolkowinski, K.: *Rezystancja uziemienia zelbetowych fundamentow budynkow mieszkalnych*, Wiad. Elektr. Nr. 15, 1975, s. 311–313.

[L10] Prast, K.: *Anwendung von Fundamenterdern*, Ökonomische Massnahmen in Erdungsbereich, Der Elektro – Praktiker, Nr. 5, 1973, s. 169–170.

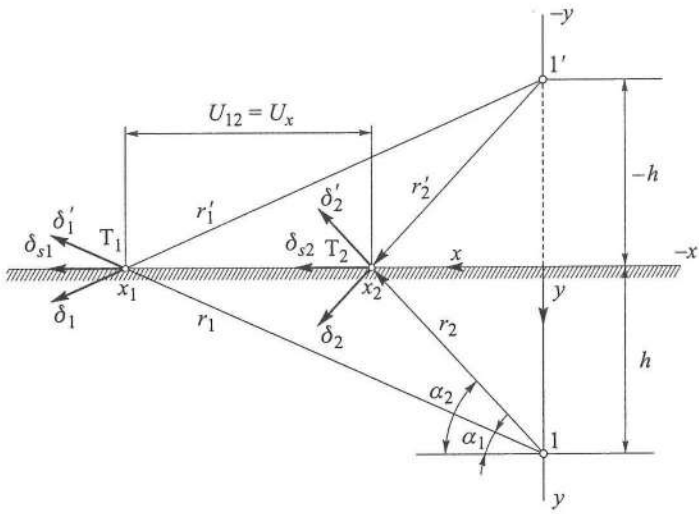
8. SASTAVLJENI UZEMLJIVAČI

8.1. TEORIJSKE PRETPOSTAVKE

8.1.1. Uzemljivač s jednim vodičem [39]

Razmotrimo na slici 8.1–1 uzemljivač 1 i točke na površini zemlje T_1 i T_2 koje su na udaljenosti od uzemljivača r_1 i r_2. Kroz uzemljivač teče struja I_z, te je razlika potencijala (napon) između točaka T_1 i T_2:

$$U_{12} = \frac{I_z \cdot \rho_z}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} \mathrm{d}r = \frac{I_z \cdot \rho_z}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{8.1–1}$$



Sl. 8.1–1. Površinska gustoća struje ds uzemljivača 1 u točkama T_1 i T_2 na površini zemlje.

Iz geometrije i oznaka na slici 8.1–1 očigledno je da je u bilo kojoj točki na površini tla $x(x_i, 0)$, $i = 1, 2, 3 \ldots n$, površinska gustoća struje:

$$\delta_s = \frac{I_z}{2\pi r}(\cos\alpha + j\sin\alpha) + \frac{I_z}{2\pi r'}(\cos\alpha - j\sin\alpha) \tag{8.1–2}$$

α je kut između smjera strujnih vektora δ i δ' i horizontalne ravnine, slika 8.1–1. Budući da je:

$$r = r' = \sqrt{x^2 + h^2}, \quad \cos\alpha = \frac{x}{r} \quad \text{i} \quad \sin\alpha = \frac{y}{r},$$

formula (8.1–2) može se napisati u obliku:

$$\delta_s = \frac{I_z}{2\pi r} 2\cos\alpha = \frac{I_z}{\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + h^2} \tag{8.1–3}$$

Napon od uzemljivača 1 između točaka T_1 i T_2 iznosi

$$U_{x(1)} = \rho_z \int_{x_1}^{x_2} \delta_s \mathrm{d}s = \frac{I_z \rho_z}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x\mathrm{d}x}{x^2 + h^2} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi} \ln \frac{x_2^2 + h^2}{x_1^2 + h^2} \tag{8.1–3a}$$

8.1.2. Mrežasti uzemljivač s N jednako razmaknutih paralelnih vodiča

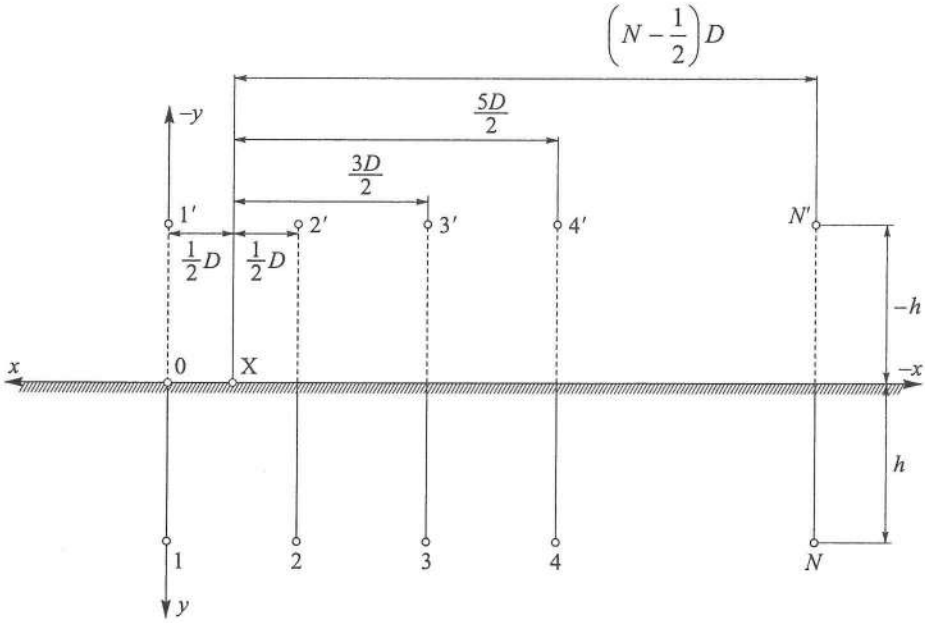
Na slici 8.1–2 prikazan je uzemljivač s paralelnim vodičima, jednako razmaknutim za D i ukopanim u dubini h.

Razmak između točke $0(0, 0)$ na površini tla i točke $X(-1/2D, 0)$ također na površini tla iznosi $0{,}5D$. Razlika potencijala od 0 do X koju proizvodi k-ti vodič uzemljivača i njegove zrcalne slike iznosi:

$$U_{x(k)} = \frac{I_z \rho_z}{\pi} \int_0^{-\frac{1}{2}D} \frac{x(k)\mathrm{d}x}{x(k)^2 + h^2}, \quad x(k) = (k-1)D + x, \; k = 1, 2 \cdots N \tag{8.1–4}$$

Pod pretpostavkom da nema međusobnog utjecaja električnog polja paralelnih vodiča, napon između točaka 0 i X jednak je zbroju napona koje proizvode pojedini vodiči:

$$U_x = \sum_1^N U_x(k) = I_z \rho_z K_{mX}(1, N) = I_z \rho_z \cdot \sum_1^N \frac{1}{2\pi} \ln \left\{ \frac{\left[(k-1)\frac{1}{2}D\right]^2 + h^2}{[(k-1)D]^2 + h^2} \right\} \tag{8.1–5}$$



Sl. 8.1–2. Oznake parametara za izračun napona u točki X generiran uzemljivačem 1.

Faktor $K_{mX}(1,N)$ opisuje učinak N vodiča u stvaranju potencijala duž osi x, pa se za točku 0 iznad prvog vodiča, a kao napon između vodiča 1 i 2 može izraziti:

$$K_{mX} = (1,N) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{0}^{N-1} \ln \frac{4h^2 + (2k-1)^2 D^2}{4h^2 + 4(kD)^2} \tag{8.1–6}$$

Potencijal mrežastog uzemljivača V_0 jednak je umnošku otpora uzemljenja R_z i struje koja teče u zemlju I_z:

$$V_0 = I_z \cdot R_z \tag{8.1–7}$$

Napon u točki 0 koji proizvodi prvi vodič i njegova zrcalna slika jednak je razlici potencijala i iznosi:

$$U_{0(1)} = V_0 - V_{y(1)} \tag{8.1–8}$$

Napon mrežastog uzemljivača U_{mr} sastavljenog od N jednako razmaknutih paralelnih vodiča za D, promjera d i ukopanih u dubinu h, ako je $D \gg h \gg d$ u odnosu na okolno tlo, računa se po formuli:

$$U_{mr} = \frac{I_z \rho_z}{L} K_i K_m \tag{8.1–9}$$

gdje je:

K_i korekcijski faktor zbog neravnomjerne gustoće struje po vodičima mrežastog uzemljivača

K_s geometrijski faktor mrežastog uzemljivača
K_m korekcijski faktor zbog međusobnog utjecaja N paralelnih vodiča
L ukupna duljina vodiča mrežastog uzemljivača, m.

Korekcijski faktori iznose:

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{3}{4}\right)\left(\frac{5}{6}\right)\left(\frac{7}{8}\right)\cdots \tag{8.1–10}$$

$$K_i = 0{,}172N + 0{,}656 \tag{8.1–11}$$

Korekcijski faktor K_i ima formu jednostavne linearne funkcije broja paralelnih vodiča u jednome smjeru. Primijetite da za $N = 2$, K_i iznosi 1.

Napon koraka mrežastog uzemljivača, ako je $D > 10h$ i $h < 0{,}25$ m, može se izračunati po pojednostavnjenoj formuli:

$$U_k = \frac{I_z\rho_z}{L}K_iK_s \tag{8.1–12}$$

Napon koraka računa se po formuli:

$$U_k = \frac{I_z\rho_z}{\pi}K_i\left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \cdots + \frac{1}{(N-1)D}\right] \tag{8.1–12a}$$

gdje je:

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D}\cdots\right) \tag{8.1–13}$$

Ta formula daje nešto veće vrijednosti za dubinu ukopa uzemljivača $h \geq 0{,}5$ m. Praksa je da se upotrebljava u kontinentalnim područjima jer se time uzima rezerva zbog smrzavanja tla.

Prema Kochovim istraživanjima [32] izračunani su umnošci korekcijskih faktora K_i i K_m, mjerenjem raspodjele površinskih potencijala na modelima kvadratnih mrežastih uzemljivača, smještenim na površinu vode u elektrolitičku posudu. Svaki od modela bio je izrađen od bakrene žice promjera 0,2 mm, kvadratnog oblika sa stranicom 120 mm.

Formula (8.1–9) daje rezultate koji su 10 – 40 % niži za zgusnute vodiče i primjenjiva je ako je $D < 5$ m i $h > 0{,}25$ m.

Faktor K_m (8.1–10) ne temelji se na potpunom matematičkom modelu, već je izveden iz jednadžbe koja uzima u obzir samo jedan vodič za izračunavanje uspravne komponente napona U_y, ali N vodiča za izračunavanje vodoravne komponente napona U_x prema slici 8.1–3a. Za točniji izračun faktora K_m po formuli (v. 4. poglavlje):

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi}\ln\left[\prod_{i=3}^{N}\frac{2i-3}{2i-2}\right] \tag{8.1–14}$$

potrebno je pored vodoravne komponente napona U_x uzeti u obzir i sve uspravne komponente napona U_y u promatranoj točki, te je ukupni napon koraka:

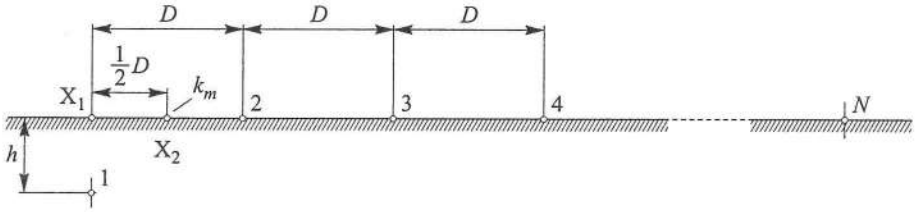
$$U_k = U_x + U_y = I_z \cdot \rho_z K_i K_{m0} \tag{8.1–15}$$

gdje je:

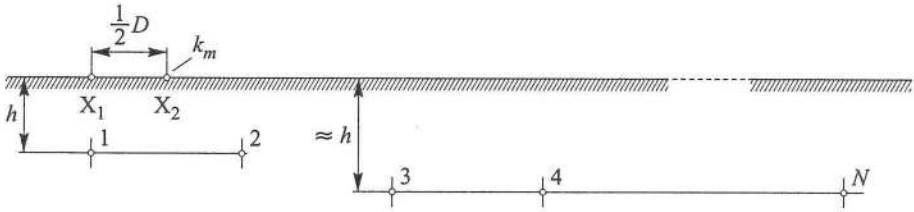
$$K_{m0} = K_{my}(1,1) + K_{mx}(1,N) \tag{8.1–16}$$

$$K_{my}(1,1) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4h^2}{4hd - d^2} \tag{8.1–17}$$

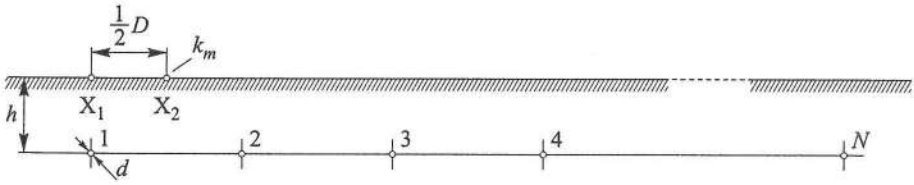
$$K_{mx}(1,N) = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \frac{4h^2 + (2k-1)^2 D^2}{4h^2 + 4(kD)^2} \tag{8.1–18}$$



Sl. 8.1–3a. Asimetrični jednostavni stari model uzemljivača za izračun faktora K_m po formuli (8.1–10).



Sl. 8.1–3b. Simetrični novi model za izračun faktora K_m po formuli (8.1–19).



Sl. 8.1–3c. Simetrični model mrežastog uzemljivača za točan izračun faktora K_m uz uvjete da je: $N < 25$, $D > 2{,}5$ m, $0{,}25$ m $< h < 2{,}5$ m, $d < 0{,}25h$ i omjer duljine i širine do 2,5 : 1.

Točna formula za izračun korekcijskog faktora K_m, ako je $h > 0$ i $N > 2$ prema slici 8.1–3b ima oblik:

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d}\right) + \frac{1}{\sqrt{1+\frac{h}{h_0}}}\ln\frac{8}{\pi(2N-1)}\right] \tag{8.1–19}$$

h_0 je jedinična dubina ukopa uzemljivača i iznosi 1 m.

Za izračun napona u točki 0 po formuli (8.1–8) potrebno je izračunati potencijal u smjeru osi y koji proizvodi vodič 1, tj. $V_{y(1)}$. Upotrebom (8.1–15), integriranjem od površine vodiča 1 i od zrcalne slike vodiča 1′ do točke 0 na granici zemlje i zraka, potencijal $V_{y(1)}$ iznosi:

$$V_{y(1)} = \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\int_{\frac{1}{2}d}^{h} \mathrm{d}y + \int_{2h-\frac{1}{2}d}^{h} \frac{1}{y'}\mathrm{d}y' =$$

$$= \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\int_{\frac{1}{2}d}^{h}\left(\frac{1}{y} - \frac{1}{2h-y}\right)\mathrm{d}y = \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\ln\left(\frac{4h^2}{4hd-d}\right) \tag{8.1–20}$$

Slično kao za vodič 1, potencijal u točki 0 koji proizvodi k-ti vodič iznosi:

$$V_0(k) = V_0 - V_y(k), \quad k = 2, 3, 4 \cdots N \tag{8.1–21}$$

Upotrebom (8.1–15) može se izračunati potencijal koji proizvodi k-ti vodič u smjeru osi y:

$$V_y(k) = \frac{\rho_z I_z}{2\pi}\int \frac{1}{r_k}\mathrm{d}r + \int \frac{1}{r_k'}\mathrm{d}r' \tag{8.1–22}$$

gdje je:

$$r_k = \sqrt{y^2 + (k-1)^2 D^2}, \quad \mathrm{d}y = \mathrm{d}r \sin\beta_k = y\frac{\mathrm{d}y}{r_k} \tag{8.1–23}$$

$$r_k' = \sqrt{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2}, \quad \mathrm{d}y = -\mathrm{d}r' \sin\beta_k' = (y-2h)\frac{\mathrm{d}y}{r_k'} \tag{8.1–24}$$

Uvrštenjem u (8.1–22) dobiva se:

$$V_Y(K) = \frac{I_z \rho_z}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^{h} \frac{y\mathrm{d}y}{y^2 + (k-1)^2 D^2} + \frac{I_z \rho_z}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^{h} \frac{(y-2h)\mathrm{d}y}{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2} =$$

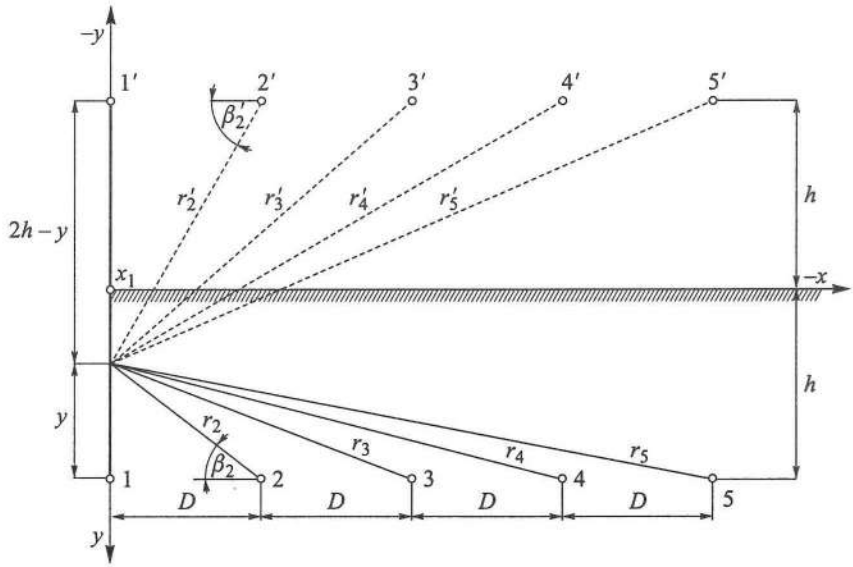
$$= \frac{I_z \rho_z}{2\pi} \ln \left[\frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + \frac{1}{4} d^2} \cdot \frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + \left(2h - \frac{1}{2} d^2\right)} \right] \tag{8.1–25}$$

Po izvršenoj supstituciji napon u točki 0 od stvarnih i zrcalnih uzemljivača je:

$$U_0 = V_0 - \sum_{k=1}^{N} V_Y(k) = V_0 - \rho_z I_z K_{mY}(1, N) = V_0 - V_Y, \quad V_Y = \sum_{k=1}^{N} V_Y(k) \tag{8.1–26}$$

gdje je:

$$K_{mY}(1, N) = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=0}^{N-1} \ln \left[\frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + \frac{1}{4} d^2} \cdot \frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + \left(2h - \frac{1}{2} d\right)^2} \right] \tag{8.1–27}$$



Sl. 8.1–4. Geometrijske koordinate vodiča (uzemljivača) 1, 2, 3, 4, i 5 na dubini h za izračun uspravnog potencijala V_y.

Napon u točki X isto se tako može odrediti uporabom formule (8.1–5):

$$U_X = V_0 - (V_X + V_Y) = V_0 - I_z \rho_z \left[K_{mX}(1,N) + K_{mY}(1,N) \right] \tag{8.1–28}$$

Budući da je potencijal mrežastog uzemljivača V_0, dodirni napon U_d između uzemljivača 1, 2, 3 ... i bilo koje točke na površini zemlje, na simetrali stvarnih i zrcalnih uzemljivača, računa se po formuli:

$$V_{\text{dod}} = V_0 - V_X = V_X + V_Y \tag{8.1–29}$$

Potencijal mrežastog uzemljivača na površini zemlje V_{mro} računa se po formuli :

$$\begin{aligned} V_{\text{mro}} &= V_X - V_Y = I_z \rho_z K_m \\ K_m &= K_{mx}(1,N) + K_{my}(1,N) \end{aligned} \tag{8.1–30}$$

Faktor $K_{mx}(1, N)$ izračunamo po formuli (8.1–6).

8.1.3. Korekcijski faktor K_m mrežastog uzemljivača sastavljenog od N paralelnih vodiča, za dubinu ukopa h i promjer vodiča d

Prema [32], zbog opširnih izvoda, daju se konačne približne formule, prikladne za praktične izračune.

Za $N = 2$ i za $h \geq 4d$:

$$K_m(N=2) \cong \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] \tag{8.1–31}$$

Za $N > 2$ i $D > h$ (obično $D \geq 2{,}5$ m i $h \leq 1$ m):

$$K_m(3,N) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=2}^{N-1} \ln \left[\frac{(2k-1)^2 D^2 + 4h^2}{4k^2 D^2 + 4h^2} \right] \tag{8.1–32}$$

Za $N > 2$ i $0 < h \leq 2{,}5$ m:

$$K_m(3,N) \approx K_{mX}(3,N) \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}} \ln \left[\frac{8}{\pi(2N-1)} \right] \tag{8.1–33}$$

gdje:

h_0 iznosi 1 m.

8.1.4. Mrežasti uzemljivač sastavljen od trakastih i štapnih uzemljivača

Uporabom (8.1–19) za točan izračun korekcijskog faktora K_m za $N > 2$ i za dubinu ukopa $h > 0$, može se izračunati potencijal mrežastog uzemljivača sastavljenog od trakastog i štapnog uzemljivača. Za izračunavanje potencijala uzemljivača mora se još definirati korekcijski faktor $K_i > 1$ kojim se uzima u obzir povećanje struje kroz paralelne vodiče mrežastog uzemljivača:

$$\frac{I_z}{R_z} = \frac{iL}{R_z} \neq K_i \frac{iL}{R_z}, \quad i = \frac{I_z}{L} \tag{8.1–34}$$

$$\frac{I_z \cdot L}{R_z} = \frac{(K_i L_c + K_{ii} L_r) I_z}{R_z}, \quad L = L_c + L_r \text{ i } K_{ii} < 1 \tag{8.1–35}$$

L je ukupna duljina vodiča uzemljivača. Tu treba uzeti u obzir i korekcijski faktor $K_{ii} < 1$, kojim se uzima u obzir neravnomjerna raspodjela struje po površini vodiča uzemljivača, ali je za faktor $K_{ii} = 1$ ukupna duljina vodiča trakastih L_c i štapnih uzemljivača L_r:

$$L = L_c + 1{,}15 L_r, \quad K_{ii} = 1 \tag{8.1–36}$$

Za mrežasti uzemljivač sa štapnim uzemljivačima ravnomjerno raspoređenim po obodu mrežastog uzemljivača,

$$L = L_c + L_r \quad \text{i faktor} \quad K_{ii} = (2N)^{-\frac{2}{N}} \tag{8.1–37}$$

Za izračun potencijala mrežastog uzemljivača sastavljenog od trakastih i štapnih uzemljivača na obodu upotrebljava se sljedeća relacija:

$$V_{mŠ} = \frac{I_z \rho_z K_i}{2\pi(L_c + 1{,}15 L_r)} \left\{ \ln\left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}} \ln\left[\frac{8}{\pi(2N-1)}\right] \right\} \tag{8.1–38}$$

Za izračun potencijala ili napon u donosu na okolno tlo mrežastog uzemljivača sastavljenog od trakastih i štapnih uzemljivača ravnomjerno raspoređenih po obodu mrežastog uzemljivača upotrebljava se sljedeća formula:

$$V_{mŠ} = \frac{I_z K_{ii} \rho_z}{2\pi(L_c + L_r)} \left\{ \ln\left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{(2N)^{\frac{2}{N}} \sqrt{1+\frac{h}{h_0}}} \ln\left[\frac{8}{\pi(2N-1)}\right] \right\} \quad (8.1\text{–}39)$$

gdje je:

$V_{mŠ}$ potencijal mrežastog uzemljivača sastavljenog od trakastih i štapnih uzemljivača

K_i korekcijski faktor kojim se uzima u obzir povećanje struje kroz paralelne vodiče, te je $K_i > 1$

K_{ii} korekcijski faktor kojim se uzima u obzir neravnomjerna raspodjela struje po presjeku vodiča, $K_{ii} < 1$

L_c duljina trakastog uzemljivača

L_r duljina štapnog uzemljivača

N broj paralelnih vodiča

i struja kroz pojedini uzemljivač

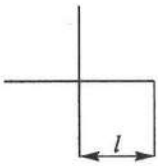
L ukupna duljina vodiča uzemljivača

I_z ukupna struja kroz uzemljivač

h_0 za faktor h_0 preporučivo je uzeti da je 1 m.

8.2. KOMBINIRANI UZEMLJIVAČ IZVEDEN SA ZRAKASTIM UZEMLJIVAČIMA POD PRAVIM KUTOM

Vrlo se često treba postići mali otpor uzemljenja u loše vodljivu tlu. To se ne može postići jednom trakom jer bi ona morala imati veliku duljinu, što bi stvaralo poteškoće. Zato se uzemljivač izvodi tako da se pod određenim kutom postavi više traka na jednom mjestu priključenih na objekt koji se želi uzemljiti. Skica takva uzemljivača od četiri trake položene međusobno pod kutom od 90° prikazana je na slici 8.2–1.



Sl. 8.2–1. Kombinirani uzemljivač s četiri trake položene međusobno pod kutom od 90° i duljine jednog kraka l.

Otpor uzemljenja takvog uzemljivača kojemu su pojedine trake ukrštene pod kutom od 90° približno se izračunava na osnovi izraza [2]:

$$R_z = \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{25 \cdot l}{r} \tag{8.2–1}$$

$$R_{z1} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{hd}, \quad R'_u = \frac{R_{z1}}{n}, \quad R_u = \frac{R'_u}{\eta} \tag{8.2–2}$$

gdje je:

- l duljina jednog kraka zrakastog uzemljivača, m
- r polumjer trakastog uzemljivača, m
- R_{z1} otpor uzemljenja jednog kraka zrakastog uzemljivača duljine l, Ω
- R_z otpor kombiniranog uzemljivača s četiri zrakasta uzemljivača pod kutom od 90°, Ω
- R'_u ukupni otpor uzemljenja zrakastog uzemljivača bez utjecaja kraka zrakastog uzemljivača, Ω
- R_u stvarni otpor uzemljenja zrakastog uzemljivača s utjecajem zrakastih uzemljivača na povećanje otpora uzemljenja, Ω
- η koeficijent iskorištenja uzemljivača (iz tablice 6.4–1)
- n broj krakova zrakastog uzemljivača.

Ako je ukopana čelična traka, onda se za r može uvrstiti vrijednost jednaka četvrtini širine trake, kao pri izračunu otpora uzemljenja trakastog uzemljivača izvedenog od pocinčane trake.

Pri polaganju tih uzemljivača mora se paziti na to da je kut između pojedinih traka veći ili barem 60°, kako se otpor uzemljenja ne bi znatnije povećao zbog međusobnog utjecaja krakova uzemljivača.

Primjer 8A

Izračunajte otpor uzemljenja trakastog uzemljivača Fe/Zn 25 × 4 mm kojem su pojedine trake ukrštene pod kutom od 90° (sl. 8.2–1) s duljinom jednog kraka s 4 kraka $l = 25$ m, položenog u zemlju otpornosti $\rho_z = 100$ Ωm i u dubinu $h = 0{,}5$ m.

Otpor uzemljenja zrakastog uzemljivača s 4 kraka izračunan po formulama (8.2–1) i (8.2–2) iznosi:

$$R_z = \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{25 \cdot l}{r} = \frac{100}{4\pi \cdot 25} \ln \frac{25 \cdot 25}{0{,}0625} = 2{,}93\ \Omega$$

Za r je uzeto 1/4 širine trake, tj. $r = 0{,}025 : 4 = 0{,}00625$ m ($r = d/2$ a za d se uzima polovina širine trake), te se dobije nešto povoljniji rezultat. U primjeru nije uzet stvarni polumjer koji iznosi: $r = 0{,}00564$ m.

Za jednake parametre trakasti uzemljivač duljine 4 × 25 m = 100 m ima otpor uzemljenja:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{hd} = \frac{100}{2\pi\cdot 100}\ln\frac{100^2}{0{,}5\cdot 0{,}0125} = 2{,}27\ \Omega$$

Vidi se da je otpor uzemljenja trakastog uzemljivača znatno manji (2,27 < 2,93 Ω). I pored toga taj tip zrakastog uzemljivača upotrebljava se na onim mjestima gdje nije moguće (zbog ograničenog prostora) izgraditi trakasti uzemljivač ili pak za gromobransko uzemljenje jer ima impulsni otpor znatno manji zbog manje duljine krakova.

Za četiri paralelna trakasta uzemljivača duljine po 25 m i jednakih parametara otpor uzemljenja jednog kraka je:

$$R_{z1} = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{hd} = \frac{100}{2\pi\cdot 25}\ln\frac{25^2}{0{,}5\cdot 0{,}125} = 7{,}33\ \Omega$$

i ukupni otpor uzemljenja (ne računajući međusobni utjecaj uzemljivača) iznosi:

$$R_z = \frac{R_{z1}}{4} = \frac{7{,}33}{4} = 1{,}83\ \Omega$$

Ukupni otpor uzemljivača od 1,83 Ω treba korigirati s faktorom η iz tablice 6.5–1 zbog međusobnog utjecaja krakova uzemljivača. Za tu konfiguraciju uzemljivača, duljine kraka 25 m, $\eta = 0{,}812$, ukupni otpor iznosi:

$$R_z' = \frac{R_z}{\eta} = \frac{1{,}83}{0{,}812} = 2{,}26\ \Omega$$

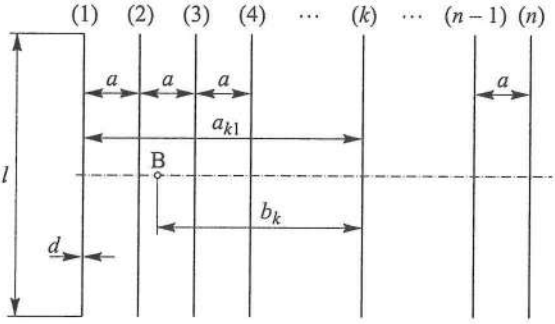
što je približno jednako otporu uzemljenja trakastog uzemljivača položenog s ukupnom duljinom od 100 m.

Vidi se da je najveći otpor uzemljenja zrakastog uzemljivača s četiri kraka po 25 m duljine po formuli (8.2–1) u iznosu: 2,93 Ω i znatno manji izračunan po formuli (8.2–2) gdje iznosi $R_z = 2{,}26\ \Omega$ (računajući kao paralelne uzemljivače).

8.3. UZEMLJIVAČ SASTAVLJEN OD *n* PARALELNIH TRAKASTIH UZEMLJIVAČA

U većim postrojenjima nije dovoljno postaviti jedan uzemljivač, već se to izvodi paralelnim spajanjem više uzemljivača. U nekim jednostavnijim slučajevima moguće je provesti točan proračun, iako se već pri nešto većem broju paralelnih uzemljivača dolazi do mnogo jednadžbi. To vrijedi za uzemljenje s istim tipom uzemljivača (samo cijevni ili samo trakasti), dok je proračun pri kombinaciji trakastih i štapnih uzemljivača složeniji i izračuna se po jednoj od formula iz poglavlja 8.6.

Postupak određivanja otpora uzemljenja prikazat ćemo na sastavljenom uzemljivaču od *n* paralelnih traka, slika 8.3–1, položenih neposredno ispod površine zemlje, jer se utjecaj normalne dubine ukopa (oko 1 m) može zanemariti zbog velike površine koju pokrivaju trake uzemljivača. U tom se slučaju zrcalno postavljeni uzemljivač nalazi neposredno položen na uzemljivač.



Sl. 8.3–1. Sastavljeni uzemljivač od n paralelnih trakastih uzemljivača, duljine l i promjera d, položenih na udaljenosti a.

Tako zamišljen uzemljivač vodi dvostruku struju $2I$. Potencijal uzemljivača (1) kroz koji protječe struja $2I$ određen je zbrojem djelovanja struje u njemu samom i djelovanjem svih ostalih struja uzemljivača. Potencijal trake (1) koji stvara struja u promatranoj traci određen je izrazom (6.2–4):

$$V_{11} = 2I_1 \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{2l}{d} = I_1 k_{11} \tag{8.3–1}$$

Indeksi »11« znače da se radi o potencijalu trake (1) koji stvara struja u istoj traci. Potencijal uzemljivača (1) zbog struje u k-toj traci određuje se prema drugom članu izraza (6.1–8):

$$V_{k1} = 2I_k \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} - 1} = I_k k_{k1} \tag{8.3–2}$$

gdje je:

$$m_{k1} = 2\frac{a_{k1}}{l} = 2\frac{(k-1)a}{l} \tag{8.3–3}$$

U (8.3–3) a_{k1} je udaljenost između prve i k-te trake, koja je jednaka $(k-1)a$, ako se radi o međusobno jednako udaljenim trakama.

Zbrajanjem djelovanja struja u svim trakama dobiva se potencijal pojedine trake, pa se na taj način dobiva onoliko jednadžbi koliko ima traka. Pri tome treba uzeti u obzir da su sve trake međusobno spojene, pa se uz dovoljno dimenzionirani dovod može računati da su sve trake na jednakom potencijalu. Prema tome dobije se sljedeći sustav jednadžba:

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 k_{11} + I_2 k_{21} + I_3 k_{31} + \ldots + I_{n-1} k_{(n-1)1} + I_n k_{n1} \\ V_2 &= I_1 k_{12} + I_2 k_{22} + I_3 k_{32} + \ldots + I_{n-1} k_{(n-1)2} + I_n k_{n2} \\ &\vdots \\ V_n &= I_1 k_{1n} + I_2 k_{2n} + I_3 k_{3n} + \ldots + I_{n-1} k_{(n-1)n} + I_n k_{nn} \end{aligned} \tag{8.3–4}$$

i

$$V_1 = V_2 = \ldots V_n = V$$

Pri simetričnom razmještaju traka postoji i simetričnost raspodjele struja, pa je $I_1 = I_n$, $I_2 = I_{n-1}$ itd. Osim toga, budući da je $k_{11} = k_{22} = \ldots = k_{nn}$ i $k_{12} = k_{21}$, $k_{13} = k_{31}$ ... (općenito $k_{ik} = k_{ki}$), od n jednadžbi dolazi se na $n/2$ jednadžbi:

$$\begin{aligned} V &= I_1(k_{11} + k_{n1}) + I_2\left(k_{21} + k_{(n-1)1}\right) + \ldots \\ V &= I_1(k_{21} + k_{n2}) + I_2\left(k_{22} + k_{(n-1)2}\right) + \ldots \\ V &= I_1(k_{31} + k_{n3}) + I_2\left(k_{23} + k_{(n-1)3}\right) + \ldots \end{aligned} \tag{8.3–5}$$

Iz tih jednadžba može se odrediti struja u svakoj traci:

$$I_k = a_k V \tag{8.3–6}$$

dok je ukupna struja:

$$I = \sum_{k=1}^{n} I_k = V \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} a_{ik} \tag{8.3–7}$$

a_{ik} su koeficijenti sustava jednadžbi (8.3–5). Prema tome otpor uzemljenja iznosi:

$$R_z = \frac{V}{I} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} a_{ik}} \tag{8.3–8}$$

Potencijal točke B (slika 8.3–1) u simetrali sastavljenog uzemljivača okomitoj na trake određuje se prema (8.3–1). Treba uvrstiti $x = 0$ i $z = b_k$, gdje je b_k udaljenost točke za koju se traži potencijal od k-te trake. Uzimajući u obzir sve trake, potencijal promatrane točke iznosi:

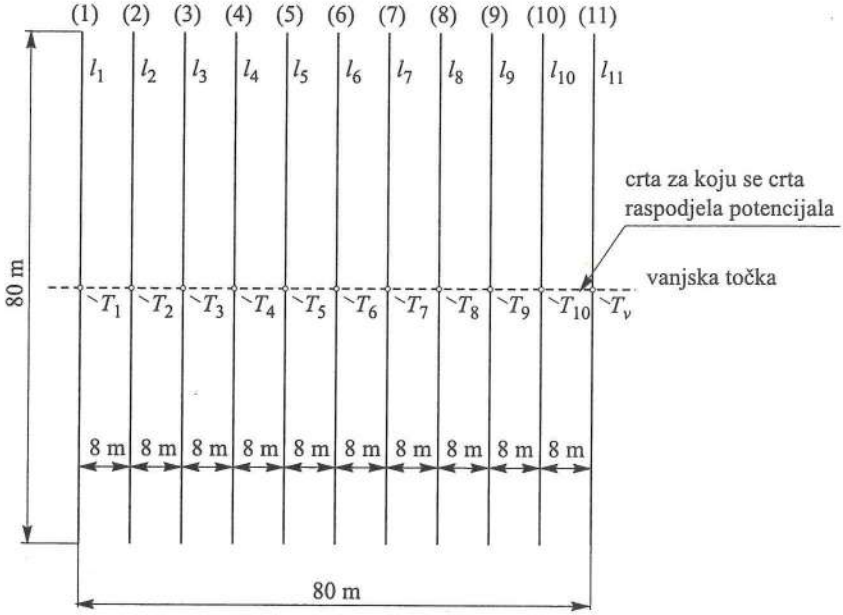
$$V_B = \frac{\rho_z}{2\pi l} \sum_{k=1}^{n} I_k \ln \frac{\sqrt{m_k^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_k^2 + 1} - 1} \tag{8.3–9}$$

gdje je:

$$m_k = 2\frac{b_k}{l} \tag{8.3–10}$$

Primjer 8B

Izračunajte otpor uzemljenja uzemljivača sastavljenog od 11 užeta promjera 10 mm, duljine $l = 80$ m, međusobne udaljenosti $a = 8$ m, položenog u tlo otpornosti $\rho_z = 200\ \Omega$m, u dubinu $h = 0{,}5$ m, kako je to prikazano na slici 8.3–2.



Sl. 8.3–2. Raspored 11 paralelnih uzemljivača duljine 80 m na međusobnoj udaljenosti od 8 m, promjera $d = 10$ mm, ukopani u dubinu $h = 0{,}5$ m.

Uzme li se u obzir simetričnost rasporeda uzemljivača, vrijedi $I_1 = I_{11}$, $I_2 = I_{10}$, $I_3 = I_9$, $I_4 = I_8$, $I_5 = I_7$, pa jednadžbe potencijala glase:

$$
\begin{aligned}
V &= I_1(k_{11} + k_{111}) + I_2(k_{21} + k_{101}) + I_3(k_{31} + k_{91}) + I_4(k_{41} + k_{81}) + \\
&\quad + I_5(k_{51} + k_{71}) + I_6 k_{61} \\
V &= I_1(k_{12} + k_{112}) + I_2(k_{22} + k_{102}) + I_3(k_{32} + k_{92}) + I_4(k_{42} + k_{82}) + \\
&\quad + I_5(k_{52} + k_{72}) + I_6 k_{62} \\
V &= I_1(k_{13} + k_{113}) + I_2(k_{23} + k_{103}) + I_3(k_{33} + k_{93}) + I_4(k_{43} + k_{83}) + \\
&\quad + I_5(k_{53} + k_{73}) + I_6 k_{63} \\
V &= I_1(k_{14} + k_{114}) + I_2(k_{24} + k_{104}) + I_3(k_{34} + k_{94}) + I_4(k_{44} + k_{84}) + \\
&\quad + I_5(k_{54} + k_{74}) + I_6 k_{64} \\
V &= I_1(k_{15} + k_{115}) + I_2(k_{25} + k_{105}) + I_3(k_{35} + k_{95}) + I_4(k_{45} + k_{85}) + \\
&\quad + I_5(k_{55} + k_{75}) + I_6 k_{65} \\
V &= I_1(k_{16} + k_{116}) + I_2(k_{26} + k_{106}) + I_3(k_{36} + k_{96}) + I_4(k_{46} + k_{86}) + \\
&\quad + I_5(k_{56} + k_{76}) + I_6 k_{66}
\end{aligned}
\tag{8.3–11}
$$

Budući da je površina koju pokriva užad uzemljivača vrlo velika u odnosu na dubinu ukopa, može se pretpostaviti da je uzemljivač neposredno ispod površine tla, a njegova zrcalna slika neposredno iznad površine tla. Iz te pretpostavke proizlazi sljedeći postupak računanja:

Prvo se računaju koeficijenti k i m:

$$k_{11} = k_{22} = k_{33} = k_{44} = k_{55} = k_{nn} = \frac{\rho}{\pi l}\ln\frac{2\cdot l}{d} = \frac{200}{\pi\cdot 80}\ln\frac{2\cdot 80}{0{,}01} = 7{,}703$$

$$k_{k1} = \frac{\rho}{2\pi\cdot l}\ln\frac{\sqrt{m_{k1}^2+1}+1}{\sqrt{m_{k1}^2+1}-1} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{m_{k1}^2+1}+1}{\sqrt{m_{k1}^2+1}-1}$$

$$m_{k1} = \frac{2}{l}(k-1)\cdot a = 0{,}2(k-1)$$

$$m_{21} = 0{,}2 \quad m_{31} = 0{,}4 \quad m_{41} = 0{,}6 \quad m_{51} = 0{,}8 \quad m_{61} = 1{,}0$$

$$m_{71} = 1{,}2 \quad m_{81} = 1{,}4 \quad m_{91} = 1{,}6 \quad m_{101} = 1{,}8 \quad m_{111} = 2{,}0$$

$$k_{21} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{0{,}2^2+1}+1}{\sqrt{0{,}2^2+1}-1} = 1{,}841 \qquad k_{71} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{1{,}2^2+1}+1}{\sqrt{1{,}2^2+1}-1} = 0{,}605$$

$$k_{31} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{0{,}4^2+1}+1}{\sqrt{0{,}4^2+1}-1} = 1{,}311 \qquad k_{81} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{1{,}4^2+1}+1}{\sqrt{1{,}4^2+1}-1} = 0{,}529$$

$$k_{41} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{0{,}6^2+1}+1}{\sqrt{0{,}6^2+1}-1} = 1{,}022 \qquad k_{91} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{1{,}6^2+1}+1}{\sqrt{1{,}6^2+1}-1} = 0{,}470$$

$$k_{51} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{0{,}8^2+1}+1}{\sqrt{0{,}8^2+1}-1} = 0{,}835 \qquad k_{101} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{1{,}8^2+1}+1}{\sqrt{1{,}8^2+1}-1} = 0{,}422$$

$$k_{61} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{1{,}0^2+1}+1}{\sqrt{1{,}0^2+1}-1} = 0{,}702 \qquad k_{111} = 0{,}398\ln\frac{\sqrt{2{,}0^2+1}+1}{\sqrt{2{,}0^2+1}-1} = 0{,}383$$

$$k_{21} = k_{32} = k_{43} = k_{54} = k_{65} = k_{76} = 1{,}841$$
$$k_{31} = k_{42} = k_{53} = k_{64} = k_{75} = k_{86} = 1{,}311$$
$$k_{41} = k_{52} = k_{63} = k_{74} = k_{85} = k_{96} = 1{,}022$$
$$k_{51} = k_{62} = k_{73} = k_{84} = k_{95} = k_{106} = 0{,}835$$
$$k_{61} = k_{72} = k_{83} = k_{94} = k_{105} = k_{116} = 0{,}702$$
$$k_{71} = k_{82} = k_{93} = k_{104} = k_{115} = 0{,}605$$
$$k_{81} = k_{92} = k_{103} = k_{114} = 0{,}529$$
$$k_{91} = k_{102} = k_{113} = 0{,}470$$
$$k_{101} = k_{112} = 0{,}422$$

Uvrsti li se vrijednosti koeficijenata k_{ij} u opću jednadžbu (8.3–11), dobiva se:

$$
\begin{aligned}
V &= 8{,}027I_1 + 2{,}263I_2 + 1{,}781I_3 + 1{,}551I_4 + 1{,}440I_5 + 0{,}702I_6 \\
V &= 2{,}263I_1 + 8{,}173I_2 + 2{,}370I_3 + 1{,}916I_4 + 1{,}724I_5 + 0{,}835I_6 \\
V &= 1{,}781I_1 + 2{,}370I_2 + 8{,}308I_3 + 2{,}543I_4 + 2{,}146I_5 + 1{,}022I_6 \\
V &= 1{,}551I_1 + 1{,}916I_2 + 2{,}543I_3 + 8{,}538I_4 + 2{,}863I_5 + 1{,}311I_6 \\
V &= 1{,}440I_1 + 1{,}724I_2 + 2{,}146I_3 + 2{,}863I_4 + 9{,}014I_5 + 1{,}841I_6 \\
V &= 1{,}404I_1 + 1{,}670I_2 + 2{,}044I_3 + 2{,}622I_4 + 3{,}682I_5 + 7{,}703I_6
\end{aligned}
\tag{8.3–12}
$$

Rješavanjem tog sustava jednadžbi dobiju se struje koje prolaze kroz pojedinu užad u ovisnosti o vlastitom potencijalu V, a otuda slijedi i otpor uzemljenja. Sustav jednadžbi (8.3–12) najbrže rješavamo koristeći se matričnim računom.

$$
\begin{bmatrix}
8{,}086I_1 & 2{,}263I_2 & 1{,}781I_3 & 1{,}551I_4 & 1{,}440I_5 & 0{,}702I_6 & | & V \\
2{,}263I_1 & 8{,}173I_2 & 2{,}370I_3 & 1{,}916I_4 & 1{,}724I_5 & 0{,}835I_6 & | & V \\
1{,}781I_1 & 2{,}370I_2 & 8{,}308I_3 & 2{,}543I_4 & 2{,}146I_5 & 1{,}022I_6 & | & V \\
1{,}551I_1 & 1{,}916I_2 & 2{,}543I_3 & 8{,}538I_4 & 2{,}863I_5 & 1{,}311I_6 & | & V \\
1{,}440I_1 & 1{,}724I_2 & 2{,}146I_3 & 2{,}863I_4 & 9{,}014I_5 & 1{,}841I_6 & | & V \\
1{,}404I_1 & 1{,}670I_2 & 2{,}044I_3 & 2{,}622I_4 & 3{,}682I_5 & 7{,}703I_6 & | & V
\end{bmatrix}
\tag{8.3–13a}
$$

$$
\begin{bmatrix}
8{,}086I_1 & 2{,}263I_2 & 1{,}781I_3 & 1{,}551I_4 & 1{,}440I_5 & 0{,}702I_6 & | & V \\
0 & 7{,}540I_2 & 1{,}872I_3 & 1{,}482I_4 & 1{,}321I_5 & 0{,}639I_6 & | & 0{,}720V \\
0 & 0 & 7{,}451I_3 & 1{,}933I_4 & 1{,}500I_5 & 0{,}708I_6 & | & 0{,}600V \\
0 & 0 & 0 & 7{,}498I_4 & 1{,}957I_5 & 0{,}876I_6 & | & 0{,}518V \\
0 & 0 & 0 & 0 & 7{,}303I_5 & 1{,}175I_6 & | & 0{,}421V \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6{,}393I_6 & | & 0{,}316V
\end{bmatrix}
\tag{8.3–13b}
$$

$I_1 = 0{,}07333$ V $\quad I_3 = 0{,}05417$ V $\quad I_5 = 0{,}04966$ V

$I_2 = 0{,}05967$ V $\quad I_4 = 0{,}05035$ V $\quad I_6 = 0{,}04938$ V

Rješenja su dana s pogreškom manjom od 0,5 %.

Ukupna struja iznosi:

$$I = 0{,}62374 \text{ A}$$

a otpor uzemljenja:

$$R_z = \frac{V}{I} = \frac{V}{0{,}62374 \cdot V} = 1{,}603\ \Omega$$

Za isti uzemljivač približan otpor uzemljenja računa se po formuli:

$$R_z' = \frac{0{,}55\rho_z}{\sqrt{A}}$$

A je površina koju prekriva uzemljivač. Slijedi:

$$R_z' = \frac{0{,}55 \cdot 200}{\sqrt{80 \cdot 80}} = 1{,}375\ \Omega$$

Pogreška približnog računa je:

$$\Delta = \frac{R_z' - R_z}{R_z} \cdot 100\ \%$$

$$\Delta = -15{,}18\,\%$$

Za crtanje krivulje površinskog potencijala na polovini duljine uzemljivača upotrebljava se formula:

$$V(x) = \frac{\rho}{2\pi l} \sum_{k=1}^{11} I_k \ln \frac{\sqrt{m_k^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_k^2 + 1} - 1}$$

gdje je:

$$m_k = 2\frac{b_k}{l}$$

b_k udaljenost od pojedinog užeta do točke za koju se računa potencijal.

Ishodište koordinatnog sustava uzima se po volji. Za $b_k = 0$ je $m_k = 0$, iz tog razloga argument logaritamske funkcije neizmjerno je velik, pa je i logaritam neizmjerno velik. Kako logaritamska funkcija ovdje definira potencijal, to rješenje ne može postojati. Zato nećemo uzeti u obzir te točke, a ima ih 11, koje daju beskonačno veliki potencijal. Računamo:

T_1: $m_1 = m_2 = 0{,}1$ $m_3 = 0{,}3$ $m_4 = 0{,}5$ $m_5 = 0{,}7$ $m_6 = 0{,}9$
$m_7 = 1{,}1$ $m_8 = 1{,}3$ $m_9 = 1{,}5$ $m_{10} = 1{,}7$ $m_{11} = 1{,}9$

$$V_{T1} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 5{,}998 + 0{,}0597 \cdot 5{,}998 + 0{,}0542 \cdot 3{,}838 + \\ +0{,}0504 \cdot 2{,}888 + 0{,}0497 \cdot 2{,}312 + 0{,}0494 \cdot 1{,}917 + \\ +0{,}0497 \cdot 1{,}632 + 0{,}0504 \cdot 1{,}417 + 0{,}0542 \cdot 1{,}250 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}118 + 0{,}0733 \cdot 1{,}009 \end{pmatrix} = 0{,}685 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T1}}{V} = 0{,}685$$

T_2: $m_1 = 0{,}3$ $m_2 = m_3 = 0{,}1$ $m_4 = 0{,}3$ $m_5 = 0{,}5$ $m_6 = 0{,}7$
$m_7 = 0{,}9$ $m_8 = 1{,}1$ $m_9 = 1{,}3$ $m_{10} = 1{,}5$ $m_{11} = 1{,}7$

$$V_{T2} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 3{,}838 + 0{,}0597 \cdot 5{,}998 + 0{,}0542 \cdot 5{,}998 + \\ +0{,}0504 \cdot 3{,}838 + 0{,}0497 \cdot 2{,}888 + 0{,}0494 \cdot 2{,}312 + \\ +0{,}0497 \cdot 1{,}917 + 0{,}0504 \cdot 1{,}632 + 0{,}0542 \cdot 1{,}417 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}250 + 0{,}0733 \cdot 1{,}118 \end{pmatrix} = 0{,}727 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T2}}{V} = 0{,}727$$

T_3: $m_1 = 0{,}5$ $m_2 = 0{,}3$ $m_3 = m_4 = 0{,}1$ $m_5 = 0{,}3$ $m_6 = 0{,}5$
$m_7 = 0{,}7$ $m_8 = 0{,}9$ $m_9 = 1{,}1$ $m_{10} = 1{,}3$ $m_{11} = 1{,}5$

$$V_{T3} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 2{,}888 + 0{,}0597 \cdot 3{,}838 + 0{,}0542 \cdot 5{,}998 + \\ +0{,}0504 \cdot 5{,}998 + 0{,}0497 \cdot 3{,}838 + 0{,}0494 \cdot 2{,}888 + \\ +0{,}0497 \cdot 2{,}312 + 0{,}0504 \cdot 1{,}917 + 0{,}0542 \cdot 1{,}632 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}417 + 0{,}0733 \cdot 1{,}250 \end{pmatrix} = 0{,}747 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T3}}{V} = 0{,}747$$

T_4: $m_1 = 0{,}7$ $m_2 = 0{,}5$ $m_3 = 0{,}3$ $m_4 = m_5 = 0{,}1$ $m_6 = 0{,}3$
$m_7 = 0{,}5$ $m_8 = 0{,}7$ $m_9 = 0{,}7$ $m_{10} = 0{,}9$ $m_{11} = 1{,}1$

$$V_{T4} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 2{,}312 + 0{,}0597 \cdot 2{,}888 + 0{,}0542 \cdot 3{,}838 + \\ +0{,}0504 \cdot 5{,}998 + 0{,}0497 \cdot 5{,}998 + 0{,}0494 \cdot 3{,}838 + \\ +0{,}0497 \cdot 2{,}888 + 0{,}0504 \cdot 2{,}312 + 0{,}0542 \cdot 1{,}917 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}632 + 0{,}0733 \cdot 1{,}417 \end{pmatrix} = 0{,}758 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T4}}{V} = 0{,}758$$

T_5: $m_1 = 0{,}9$ $m_2 = 0{,}7$ $m_3 = 0{,}5$ $m_4 = 0{,}3$ $m_5 = m_6 = 0{,}1$
$m_7 = 0{,}3$ $m_8 = 0{,}5$ $m_9 = 0{,}7$ $m_{10} = 0{,}9$ $m_{11} = 1{,}1$

$$V_{T5} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 1{,}917 + 0{,}0597 \cdot 2{,}312 + 0{,}0542 \cdot 2{,}888 + \\ +0{,}0504 \cdot 3{,}838 + 0{,}0497 \cdot 5{,}998 + 0{,}0494 \cdot 5{,}998 + \\ +0{,}0497 \cdot 3{,}838 + 0{,}0504 \cdot 2{,}888 + 0{,}0542 \cdot 2{,}312 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}917 + 0{,}0733 \cdot 1{,}632 \end{pmatrix} = 0{,}764 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T5}}{V} = 0{,}764$$

T_6: $m_1 = 0{,}1$ $m_2 = 0{,}9$ $m_3 = 0{,}7$ $m_4 = 0{,}5$ $m_5 = 0{,}3$
$m_6 = m_7 = 0{,}1$ $m_8 = 0{,}3$ $m_9 = 0{,}5$ $m_{10} = 0{,}7$ $m_{11} = 0{,}9$

$$V_{T6} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 1{,}632 + 0{,}0597 \cdot 1{,}917 + 0{,}0542 \cdot 2{,}312 + \\ +0{,}0504 \cdot 2{,}888 + 0{,}0497 \cdot 3{,}838 + 0{,}0494 \cdot 5{,}998 + \\ +0{,}0497 \cdot 5{,}998 + 0{,}0504 \cdot 3{,}838 + 0{,}0542 \cdot 2{,}888 + \\ +0{,}0597 \cdot 2{,}312 + 0{,}0733 \cdot 1{,}917 \end{pmatrix} = 0{,}764 \text{ V}$$

$$\frac{V_{T6}}{V} = 0{,}764$$

Zbog simetrije za ostale točke nije potrebno računati potencijal. Ostaje još da izračunamo potencijal za dvije istovrijedne vanjske točke.

T_v: $m_1 = 0{,}1$ $m_2 = 0{,}3$ $m_3 = 0{,}5$ $m_4 = 0{,}7$ $m_5 = 0{,}9$ $m_6 = 1{,}3$
$m_7 = 1{,}3$ $m_8 = 1{,}5$ $m_9 = 1{,}7$ $m_{10} = 1{,}9$ $m_{11} = 2{,}1$

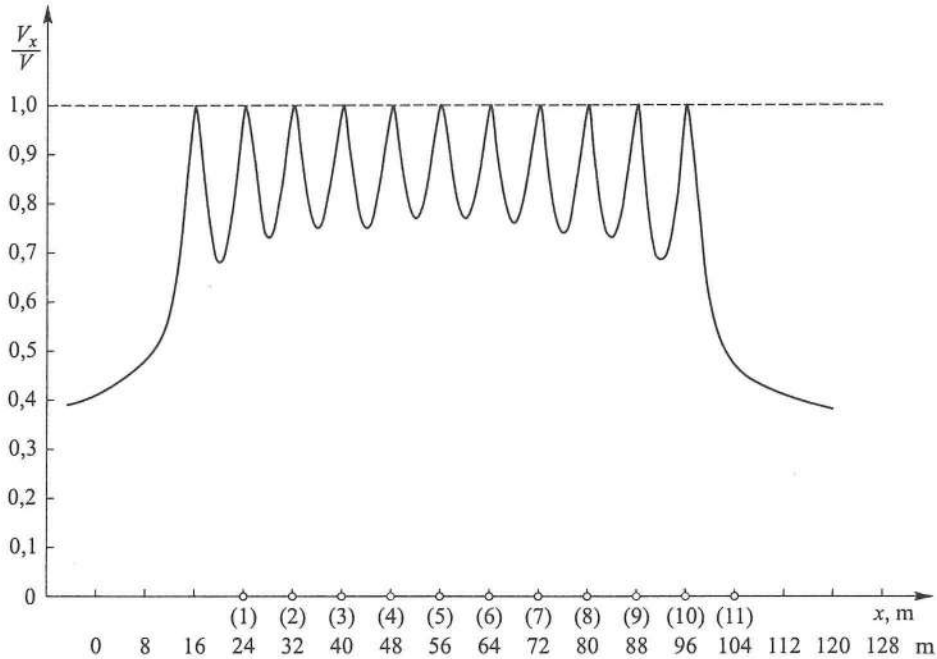
$$V_{Tv} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 5{,}998 + 0{,}0597 \cdot 3{,}838 + 0{,}0542 \cdot 2{,}888 + \\ +0{,}0504 \cdot 2{,}312 + 0{,}0497 \cdot 1{,}917 + 0{,}0494 \cdot 1{,}632 + \\ +0{,}0497 \cdot 1{,}417 + 0{,}0504 \cdot 1{,}250 + 0{,}0542 \cdot 1{,}119 + \\ +0{,}0597 \cdot 1{,}009 + 0{,}0733 \cdot 0{,}920 \end{pmatrix} = 0{,}573 \text{ V}$$

$$\frac{V_{Tv}}{V} = 0{,}573$$

T_{v1}: $m_1 = 0{,}3$ $m_2 = 0{,}5$ $m_3 = 0{,}7$ $m_4 = 0{,}9$ $m_5 = 1{,}1$ $m_6 = 1{,}3$
$m_7 = 1{,}5$ $m_8 = 1{,}7$ $m_9 = 1{,}9$ $m_{10} = 2{,}1$ $m_{11} = 2{,}3$

$$V_{Tv1} = 0{,}398 \cdot V \cdot \begin{pmatrix} 0{,}0733 \cdot 3{,}838 + 0{,}0597 \cdot 2{,}888 + 0{,}0542 \cdot 2{,}312 + \\ +0{,}0504 \cdot 1{,}917 + 0{,}0497 \cdot 1{,}632 + 0{,}0494 \cdot 1{,}417 + \\ +0{,}0497 \cdot 1{,}250 + 0{,}0504 \cdot 1{,}118 + 0{,}0542 \cdot 1{,}009 + \\ +0{,}0597 \cdot 0{,}920 + 0{,}0733 \cdot 0{,}844 \end{pmatrix} = 0{,}444 \text{ V}$$

$$\frac{V_{Tv1}}{V} = 0{,}444$$



Sl. 8.3–3. Razdioba potencijala u relativnim jedinicama na presjeku uzemljivača $T_1 - T_v$, slika 8.3–2.

8.4. UZEMLJIVAČ SASTAVLJEN OD OKOMITIH ŠTAPNIH UZEMLJIVAČA

U slučaju štapnih uzemljivača postupa se analogno. Potencijal kojeg stvara struja u promatranom uzemljivaču određuje se prema (5.1–4):

$$V_{k1} = I_1 \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{4l}{d} = I_1 \cdot k_{11} \tag{8.4–1}$$

a potencijal promatranog uzemljivača (1) koji stvara struja u k-tom uzemljivaču prema (5.1–4):

$$V_{k1} = I_k \frac{\rho_z}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_{k1}^2 + 1} - 1} = I_k k_{k1} \tag{8.4–2}$$

gdje je:

$$m_{k1} = \frac{a_{k1}}{l} \tag{8.4–3}$$

a_{k1} je udaljenost između štapnog uzemljivača (1) i štapnog k-tog uzemljivača, a l je duljina štapnog uzemljivača. Poznavajući koeficijente k, otpor uzemljenja i potencijal na površini zemlje određuju se na već opisani način.

Štapni uzemljivači mogu se izvesti tako da su svi smješteni na kružnici u vrhovima pravilnog mnogokuta. U tom su slučaju struje u svim štapnim uzemljivačima međusobno jednake, čime proračun postaje znatno jednostavniji. Tada potencijal svakog uzemljivača iznosi:

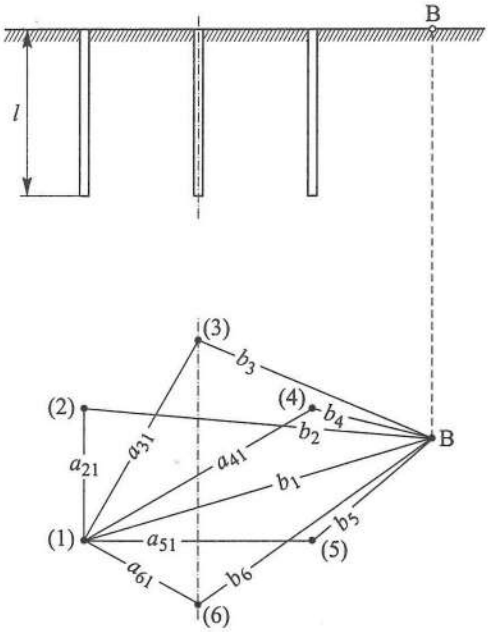
$$V = \frac{I_z}{n} \cdot \frac{\rho_z}{2\pi l}\left(\ln\frac{4l}{d} + \frac{1}{2}\sum_{k=2}^{n}\ln\frac{\sqrt{m_{k1}^2+1}+1}{\sqrt{m_{k1}^2+1}-1}\right) \tag{8.4–4}$$

gdje je:

n broj štapnih uzemljivača

I_z ukupna struja uzemljivača

m_{k1} omjer definiran jednadžbom (8.4–3).



Sl. 8.4–1. Simetrični raspored štapnih uzemljivača.

Pri određivanju potencijala bilo koje točke na površini zemlje može se poći od (8.4–2), s tim da se umjesto m_{k1} uvrsti m_k:

$$m_k = \frac{b_k}{l} \tag{8.4–5}$$

b_k je udaljenost promatrane točke od k-tog uzemljivača. Uzimajući u obzir utjecaj svih uzemljivača, potencijal promatrane točke B iznosi:

$$V_B = \frac{I}{n} \cdot \frac{\rho_z}{4\pi l} \sum_{k=1}^{n} \ln \frac{\sqrt{m_k^2 + 1} + 1}{\sqrt{m_k^2 + 1} - 1} \tag{8.4–6}$$

8.5. PARALELNO SPOJENI ŠTAPNI UZEMLJIVAČI

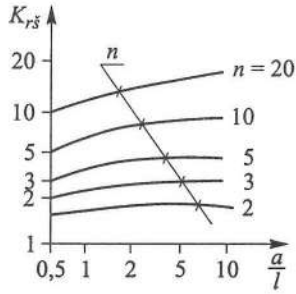
Ako imamo samo dva paralelno spojena štapna uzemljivača i ako su udaljeni jedan od drugoga barem za dvostruku duljinu jednoga od njih, može se približno uzeti da je ukupni otpor uzemljenja jednak otporu njihova paralelnog spoja. To vrijedi sve dotle dok ih nije previše. Ako je mnogo uzemljivača spojenih paralelno, njihov je međusobni utjecaj mnogo veći, pa se ukupni otpor uzemljenja ne može računati kao spoj paralelnih otpora, nego se on dobiva prema izrazu:

$$R_z = \frac{R_{z1}}{K_{r\check{s}}} \tag{8.5–1}$$

gdje je:

R_{z1} otpor uzemljenja jednoga štapnoga uzemljivača, Ω

$K_{r\check{s}}$ redukcijski faktor, očitava se iz dijagrama na slici 8.5–1 u ovisnosti o omjeru a/l.



n – broj paralelno spojeni štapnih uzemljivača
a – srednja udaljenost između paralelnih štapnih uzemljivača, m
l – srednja duljina upotrijebljenih uzemljivača, m
t – dubina ukopa (od gornjeg ruba uzemljivača do površine tla), m

Sl. 8.5–1. Redukcijski faktor $K_{r\check{s}} = f(a/l)$.

Proračun ukupnog otpora uzemljenja s pomoću redukcijskog faktora $K_{r\check{s}}$ vrijedi ako je razmak između paralelno spojenih uzemljivača veći od njihove dubine ukopa, tj $a > t$. Osim toga, svi uzemljivači moraju biti približno simetrično raspoređeni i moraju imati približno jednaku duljinu.

Primjer 8C

Izračunajte otpor uzemljenja dva, pet i deset paralelno spojenih štapnih uzemljivača duljine 2 m, promjera 60 mm, ukopanih u zemlju otpornosti ρ_z = 100 Ωm i međusobno razmaknutih 3 m.

Otpor uzemljenja jednoga cijevnog uzemljivača (5.10) iznosi:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} = \frac{100}{2\pi\cdot 2}\ln\frac{4\cdot 2}{0,06} = 38,94\ \Omega$$

Za dva, pet i deset paralelno spojenih štapnih uzemljivača primjenom redukcijskog faktora $K_{rš}$ zbog međusobnog utjecaja uzemljivača: (slika 8.5–1) dobiva se:

– za dva uzemljivača n = 2 računajući bez međusobnog utjecaja: 38,94 : 2 = 19,47 Ω

$$\frac{a}{l} = \frac{3}{2} = 1,5 \rightarrow K_r = 1,8$$

$$R_{z2} = \frac{38,94}{1,8} = 21,63\ \Omega$$

– za pet uzemljivača n = 5 računajući bez međusobnog utjecaja: 38,94 : 5 = 7,788 Ω

$$\frac{a}{l} = \frac{3}{2} = 1,5 \rightarrow K_r = 4$$

$$R_{z5} = \frac{38,94}{4} = 9,735\ \Omega$$

– za deset uzemljivača n = 10 računajući bez međusobnog utjecaja: 38,94 : 10 = 3,894 Ω

$$\frac{a}{l} = \frac{3}{2} = 1,5 \rightarrow K_r = 8$$

$$R_{z10} = \frac{38,94}{8} = 4,8675\ \Omega$$

Kako vidimo otpor je uzemljenja zbog međusobnog utjecaja uzemljivača veći u odnosu na izračun bez međusobnog utjecaja. Povećanje izraženo u postocima iznosi (razumljivo je da ono raste s povećanjem broja uzemljivača):

– za dva uzemljivača:

$$\frac{21,63}{\frac{38,94}{2}}\cdot 100 = 11,09\%$$

– za pet uzemljivača:

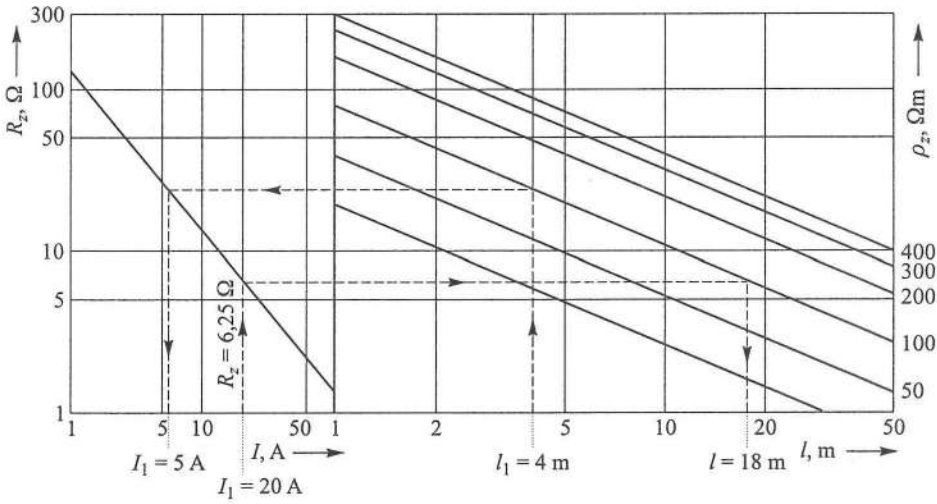
$$\frac{9,735}{\frac{38,94}{5}}\cdot 100 = 25,00\%$$

– za deset uzemljivača:

$$\frac{\frac{4{,}8675}{38{,}94}}{10} \cdot 100 = 25{,}00\ \%$$

Primjer 8D

Duljina i broj štapnih uzemljivača za uzemljenje transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV, ako ima izoliranu nul-točku ili nul-točku transformatora uzemljenu preko prigušnice, može se približno odrediti iz dijagrama na slici 8.5–2. Potreban otpor uzemljenja u ovisnosti o struji (lijevi dio dijagrama) određen je zahtjevom da napon uzemljivača ne bude veći od 125 V, što traže tehnički propisi za postrojenja koja nemaju izravno uzemljenu nul-točku. Desni dio dijagrama prikazuje ovisnost otpora uzemljenja o duljini uzemljivača, i to za različite otpornosti tla.



Sl. 8.5–2. Dijagram za određivanje broja i duljine štapnih uzemljivača za uzemljenje TS 10(20)/0,4 kV s izoliranom nul-točkom 10 kV mreže.

Uporabu dijagrama objasnit ćemo na primjeru. Neka je struja zemnog spoja $I_z = 20$ A, tj. najveća dopuštena struja zemljospoja za izoliranu mrežu nazivnog napona 10 kV, prema pravilniku [65] otpor uzemljenja ne smije prijeći vrijednost $R_z = 125/20 = 6{,}25\ \Omega$. Uz otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega$m, potrebna je duljina cijevnog uzemljivača $l = 18$ m, ako bi se postavio samo jedan uzemljivač. Uzemljivač te dubine teško je izvesti jer se zahtijeva specijalna oprema a pored toga izvedba tako dugog uzemljivača bila bi skupa, pa se treba odlučiti za uzemljivač manje duljine. Neka smo se, s obzirom na mogućnost pobijanja uzemljivača, odlučili na maksimalnu duljinu uzemljivača $l_1 = 4$ m. Ako nema međusobnog utjecaja među uzemljivačima, te ako napon na uzemljivaču ne smije biti veći od 125 V,

kroz svaki od njih moći će protjecati struja $I_1 = 5$ A, te su potrebna $n = 4$ štapna uzemljivača.

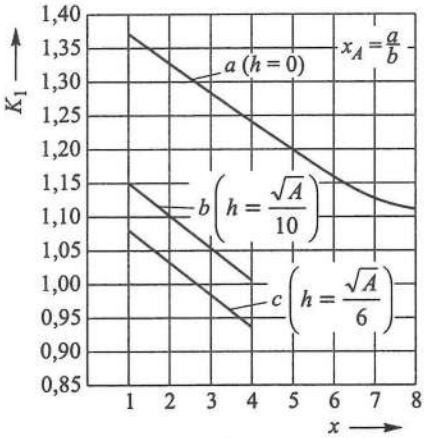
Zbog međusobnog utjecaja otpor četiriju uzemljivača nije jednak četvrtini otpora jednog od njih, pa dopuštenu struju kroz svaki uzemljivač treba množiti s korekcijskim faktorom 0,85, (prema [1], uzeto kao primjer) ako razmak među uzemljivačima iznosi približno dvostruku duljinu uzemljivača. Uzimajući u obzir spomenuti faktor, potreban broj uzemljivača iznosi:

$$n = \frac{I_z}{0{,}85} \cdot I_1 = \frac{20}{0{,}85} \cdot 5 = 4{,}7 \cong 5$$

Taj proračun uzemljenja samo je približan, jer su neki elementi zanemareni.

8.6. KOMBINIRANI UZEMLJIVAČI SA SKUPINAMA ŠTAPNIH UZEMLJIVAČA

Uzemljivački sustavi postrojenja obično se izvode kao kombinacija vodoravnih mrežastih uzemljivača i skupine štapnih uzemljivača. Utjecaj skupine štapnih uzemljivača posebno je važan ako oni prodiru u sloj tla manje otpornosti od sloja u kojem leži mrežasti uzemljivač. Zato je potrebno, za praktične proračune, raspolagati dovoljno točnim analitičkim izrazima za procjenu otpora uzemljenja takvih uzemljivača.



$y_A = -0{,}04\,x_A + 1{,}41$
$y_B = -0{,}05\,x_A + 1{,}20$
$y_C = -0{,}05\,x_A + 1{,}13$

h – dubina ukopa štapnog uzemljivača (od površine do gornjeg ruba uzemljivača), m
x_A – omjer između duljine a i širine b površine tla obuhvaćene skupinom štapnih uzemljivača

Sl. 8.6–1. Vrijednosti koeficijenta K_1 u funkciji parametara x_A. Krivulja a je za $h = 0$, krivulja b za $h = \sqrt{A}/10$, krivulja c za $h = \sqrt{A}/6$.

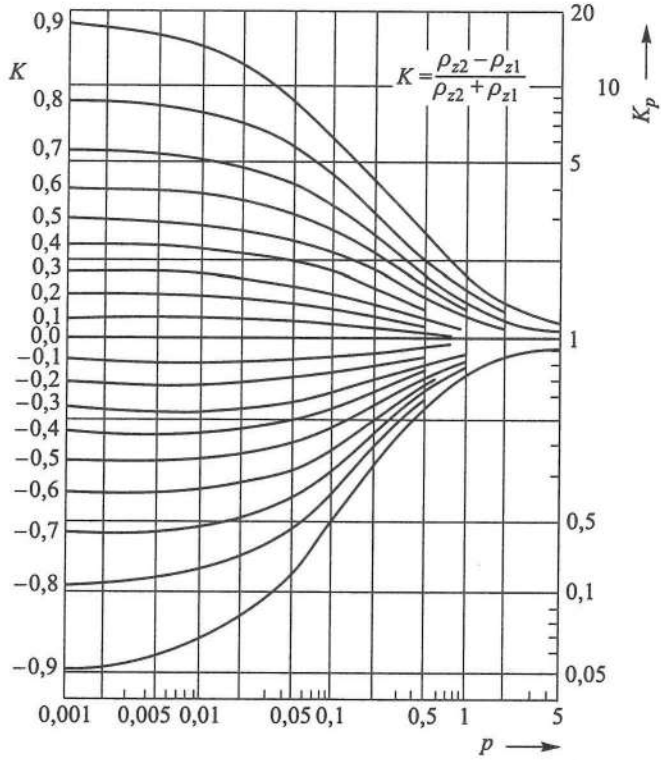
Schwarz je predložio sljedeću formulu za izračun otpora uzemljenja grupe štapnih uzemljivača u homogenom tlu [L1]:

$$R_{zG\check{S}} = \frac{\rho_z}{2\pi n l}\left[\ln\frac{8l}{d} - 1 + \frac{2l}{\sqrt{A}}K_1\left(\sqrt{n}-1\right)^2\right] \qquad (8.6\text{–}1)$$

gdje je:

$R_{zG\check{S}}$ otpor uzemljenja skupine štapnih izmjenjivača u homogenom tlu, Ω
d promjer štapnog uzemljivača, m
l duljina štapnog uzemljivača, m
n ukupan broj štapnih uzemljivača
A površina obuhvaćena skupinom štapnih uzemljivača, m^2
K_1 geometrijski koeficijent prema dijagramu na slici 8.6–1
$R_{zG\check{S}G}$ otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača u dvoslojnom tlu, ako su uzemljivači samo u gornjem sloju, m.

Za $n \to \infty$ (8.6–1) daje otpor uzemljenja pravokutne vodoravne ploče s parametrima A i h.



Sl. 8.6–2. Vrijednosti K_p u ovisnosti o parametru p, $p = H/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} < \rho_{z2}$, $p = (H-h)/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} > \rho_{z2}$.

Schwarzova poboljšanja omogućuju primjenu (8.6–1) i u slučaju dvoslojnog tla. Ako su štapni uzemljivači samo u gornjem sloju tla, onda je:

$$R_{zGŠG} = \frac{\rho_z}{2\pi nl}\left[\ln\frac{8l}{d} - 1 + \frac{2l}{\sqrt{A}}K_1K_p\left(\sqrt{n}-1\right)^2\right] \qquad (8.6\text{–}2)$$

gdje je:

K_p korekcijski faktor zbog nehomogenosti tla za uzemljivač u gornjem sloju tla, prema dijagramu na slici 8.6–2

$$K = \frac{\rho_{z2} - \rho_{z1}}{\rho_{z2} + \rho_{z1}}$$

ρ_{z1} otpornost gornjeg sloja tla

ρ_{z2} otpornost donjeg sloja tla

K_1 korekcijski faktor za dvoslojno tlo specifičnog otpora ρ_{z1} i ρ_{z2}.

Za $n \to \infty$ formula (8.6–2) daje otpor uzemljenja pravokutne ploče s parametrima A, h, K i H u dvoslojnom tlu.

Ako štapovi prodiru u donji sloj tla, onda je formula za izračun otpora uzemljenja skupine štapnih uzemljivača:

$$R_{zGŠD} = \frac{\rho_{za}}{2\pi nl}\left[\ln\frac{8l}{d} - 1 + \frac{\rho_{z2}}{n\pi\sqrt{A}}K_1(0)K'_p\left(\sqrt{n}-1\right)^2\right] \qquad (8.6\text{–}3)$$

gdje je:

$$l_e = l_2 + \frac{\rho_{z2}l_1}{\rho_{z1}} \qquad (8.6\text{–}4)$$

$$\rho_{za} = \frac{\rho_{z2}l}{l_e} \qquad (8.6\text{–}5)$$

l_e ekvivalentna duljina štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu otpornosti ρ_{z1} i ρ_{z2}

l_1 duljina dijela štapa u gornjem sloju tla, m

l_2 duljina dijela štapa u donjem sloju tla, m

$K_1(0)$ geometrijski faktor za ploču, krivulja a za $h = 0$ površinski uzemljivač na slici 8.6–1

K'_p korekcijski faktor uslijed nehomogenosti tla za uzemljivač koji leži u donjem sloju tla prema dijagramu na slici 8.6–3

H debljina gornjeg sloja tla otpornosti ρ_{z1}, m

P parametar, $P = H/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} < \rho_{z2}$ i $P = (H-h)/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} > \rho_{z2}$

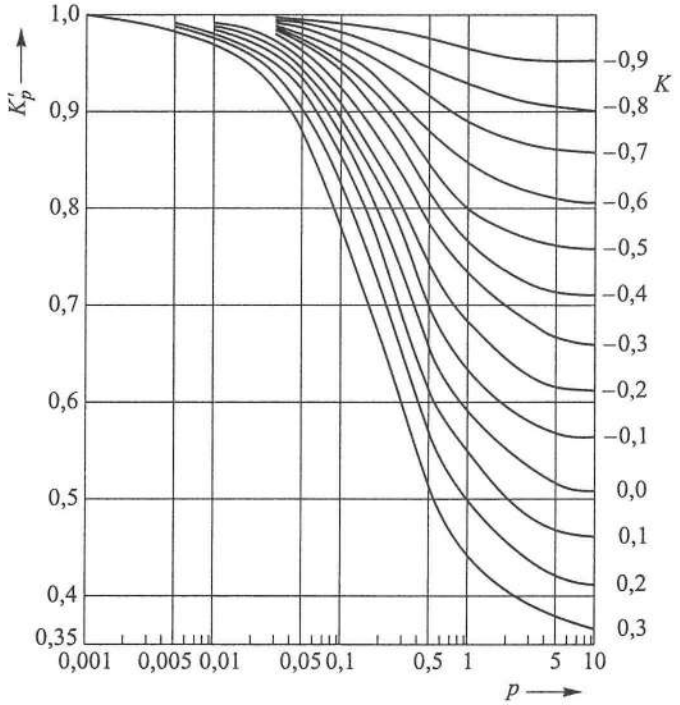
l duljina štapnog uzemljivača, m

$R_{zGŠD}$ otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača u dvoslojnom tlu, ako štapni uzemljivači prodiru u donji sloj tla, Ω

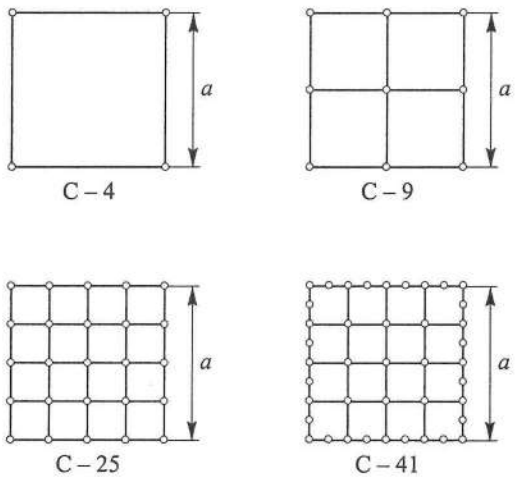
ρ_{za} ekvivalentna otpornost dvoslojnog tla pri prodiranju štapnog uzemljivača u donji sloj tla, Ωm.

Kao što se vidi iz slike 8.6–3:

$$K'_p \approx 1 \text{ za } \frac{H}{\sqrt{A}} \le 10^{-2} \text{ i } K \le 0{,}3.$$



Sl. 8.6–3. Vrijednosti K'_p u ovisnosti o parametru p, $p = H/\sqrt{A}$.



Sl. 8.6–4. Parametri kombiniranih uzemljivača sa skupinama štapnih uzemljivača;
parametri štapova: $l = 5$ m i $d = 0{,}0635$ m;
parametri vodiča mreže: $h = 0{,}5$ m i $d = 0{,}01$ m.

Za $n \to \infty$ formula (8.6–3) daje otpor uzemljenja vodoravne ploče koja leži u donjem sloju tla, neposredno ispred granične površine slojeva. Ekvivalentnom duljinom štapova l_e obuhvaćen je utjecaj dijelova štapova u različitim slojevima tla na raspodjelu struje odvođenja s uzemljivača.

Točnost formula (8.6–2) i (8.6–3) provjerena je uspoređivanjem s rezultatima dobivenim računalnim proračunom [L3] za niz primjera. Analizirani primjeri uzemljivačkih konfiguracija prikazani su na slici 8.6–4. Pritom su analizirane konfiguracije koje sadrže samo štapove, bez odgovarajućih mreža, iako u stvarnosti postoji mreža za povezivanje štapnih uzemljivača.

Tablica 8.6–1 Omjer izračunanog otpora uzemljenja $R_{zGŠD}$ uporabom formule (8.6–3) (i dijagrama 8.6–1 i 8.6–2) i točnog otpora uzemljenja $R_{zGŠD}$ i za kombinaciju skupina štapnih uzemljivača prema slici 8.6–4, za a = 50 m i razne vrijednosti H i ρ_{z1}/ρ_{z2}.

$\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}$	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
			a = 50 m, H = 1 m				
C – 4	1,222	1,065	1,010	0,965	0,965	0,954	0,950
C – 9	1,064	1,039	1,001	0,980	0,967	0,957	0,952
C – 25	1,990	0,996	0,987	0,978	0,974	0,965	0,965
C – 41	1,004	1,017	1,016	1,016	1,012	0,999	1,004
			a = 50 m, H = 3 m				
C – 4	0,991	1,003	0,993	0,978	0,963	0,950	0,945
C – 9	0,919	0,955	0,975	0,970	0,961	0,952	1,051
C – 25	0,878	0,913	0,944	0,954	0,955	0,953	0,949
C – 41	0,911	0,942	0,968	0,976	0,973	0,979	0,979
			a = 50 m, H = 5 m				
C – 4	0,948	0,980	0,995	0,981	0,958	0,928	0,915
C – 9	0,871	0,920	0,962	0,967	0,954	0,929	0,917
C – 25	0,847	0,882	0,921	0,936	0,937	0,925	0,917
C – 41	0,886	0,916	1,037	0,951	1,028	0,933	0,926

U tablici 8.6–1 dani su rezultati proračuna za niz konfiguracija skupine štapnih uzemljivača sa slike 8.6–4 za razne omjere ρ_{z1}/ρ_{z2} i H. U tablici 8.6–2 dani su rezultati proračuna za konfiguraciju štapnih uzemljivača C – 9 za razne vrijednosti parametra a i omjera H/l. Zapaža se zadovoljavajuća točnost približnih formula u svim promatranim slučajevima. To se posebno primjećuje u slučajevima kod kojih štapovi prodiru u donji sloj tla i ako je $\rho_{z1}/\rho_{z2} \geq 1$, tj. u slučajevima koji su zanimljivi za praksu.

Tablica 8.6–2. Omjer izračunanog otpora uzemljenja $R_{zG\check{S}D}$ uporabom formule (8.6–3) i točnog otpora uzemljenja $R_{zG\check{S}D}$ za skupinu štapnih uzemljivača C – 9, za razne vrijednosti a, a/l, H/l i ρ_{z1}/ρ_{z2}.

	$\frac{H}{l}$							
$\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4
				$a = 10$ m, $a/l = 2$				
0,1	0,932	0,833	0,799	0,786	0,785	0,800	0,858	0,897
0,2	0,958	0,876	0,841	0,826	0,824	0,866	0,916	0,948
0,5	0,986	0,926	0,893	0,876	0,870	0,976	1,012	1,018
1	1,010	0,954	0,925	0,904	0,891	1,069	1,069	1,069
2	1,010	0,972	0,946	0,923	0,897	1,154	1,125	1,110
5	1,015	0,986	0,961	0,937	0,896	1,239	1,177	1,148
10	1,017	0,990	0,962	0,944	0,897	1,277	1,199	1,163
				$a = 20$ m, $a/l = 4$				
0,1	0,987	0,883	0,839	0,916	0,804	0,752	0,762	0,828
0,2	0,992	0,921	0,884	0,861	0,849	0,816	0,853	0,879
0,5	0,981	0,951	0,927	0,911	0,902	0,920	0,939	0,952
1	0,980	0,959	0,948	0,932	0,925	1,046	1,046	1,046
2	0,975	0,961	0,951	0,942	0,930	1,079	1,060	1,048
5	0,972	0,961	0,953	0,943	0,919	1,150	1,110	1,086
10	0,970	0,961	0,952	0,943	0,913	1,180	1,131	1,102
				$a = 50$ m, $a/l = 10$				
0,1	1,064	0,965	0,919	0,890	0,871	0,762	0,792	0,813
0,2	1,039	0,986	0,955	0,934	0,920	0,971	0,973	0,974
0,5	1,001	0,982	0,973	0,965	0,962	0,975	0,976	0,976
1	0,980	0,972	0,970	0,966	0,967	0,985	0,985	0,985
2	0,967	0,963	0,961	0,958	0,954	1,033	1,026	1,021
5	0,957	0,954	0,952	0,946	0,929	1,073	1,055	1,051
10	0,952	0,950	1,051	0,942	0,917	1,090	1,073	1,062

8.7. KOMBINIRANI UZEMLJIVAČ S MREŽASTIM I ŠTAPNIM UZEMLJIVAČIMA

U praksi se prema potrebi izvode razne kombinacije trakastih i štapnih uzemljivača. Tako se za zaštitu nekog objekta, zgrade ili postrojenja, mogu izvesti trakasti uzemljivači u obliku četverokuta ili prstena. Ako se na takav način ne postigne mali otpor uzemljenja, izvode se dva takva međusobno spojena četverokutna ili dva takva koncentrična prstenasta uzemljivača. Ako se i takvom izvedbom ne ostvare povoljni rezultati, tad se trakasti uzemljivači izvode tako da tvore jednu mrežu. Već prema prilikama i zahtjevima, trakasti se uzemljivači kombiniraju i sa štapnim uzemljivačima. To se izvodi tako da se primjerice na obodu jednoga trakastog četverokutnog

uzemljivača postave još i štapni uzemljivači. Na taj se način postupa posebno onda ako nema dovoljno prostora gdje bi se ukopali samo trakasti uzemljivači, pa za smanjenje ukupnog otpora uzemljenja služi dubina zemlje.

Otpor uzemljenja kombiniranoga uzemljivačkog sustava, koji se sastoji od skupine štapnih i mrežastih uzemljivača, može se izračunati s pomoću formule [L1]:

$$R_{zC} = \frac{R_{zG\check{S}} \cdot R_{zMR} - R_{z\check{S}M}^2}{R_{zG\check{S}} + R_{zMR} - 2R_{z\check{S}M}} \tag{8.7–1}$$

gdje je:

R_{zC} otpor uzemljenja kombiniranoga uzemljivačkog sustava sastavljenog od štapnih i mrežastih uzemljivača

$R_{zG\check{S}}$ otpor uzemljenja za skupinu štapnih uzemljivača; ako je dvoslojno tlo u dubini polaganja uzemljivača, te ako su štapni uzemljivači samo u gornjem sloju, treba upotrijebiti formulu (8.6–2); ako su položeni u gornji i donji sloj, onda treba upotrijebiti formulu (8.6–3)

R_{zMR} otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača

$R_{z\check{S}M}$ otpor uzemljenja između skupine štapnih i mrežastih uzemljivača.

Dobru procjenu vrijednosti R_{zMR} za vodoravne uzemljivačke mreže koje leže na gornjem sloju tla daje formula [L2]:

$$R_{zMR} = \frac{\rho_{z1}}{\pi l}\left[K_{rr}\left(\ln\frac{2l}{h'} + N - 1\right) + K_p K_1\left(\frac{L}{\sqrt{A}} - \frac{2(x_A + 1)}{\sqrt{x_A}}\right)\right] \tag{8.7–2}$$

gdje je:

L ukupna duljina vodiča uzemljivačke mreže, m

K_{rr} korekcijski faktor zbog nehomogenosti tla [L2] jednokonturne uzemljivačke mreže s parametrima A i h, slika 8.7–1

N geometrijski parametar [L1], slika 8.7–2

h' $= d/2$ ekvivalentna dubina ukopa ako su vodiči mreže na samoj površini tla, m

h' $= \sqrt{dh}$ ekvivalentna dubina ukopa ako su vodiči mreže ukopani na dubini h, m

d promjer vodiča mreže, m

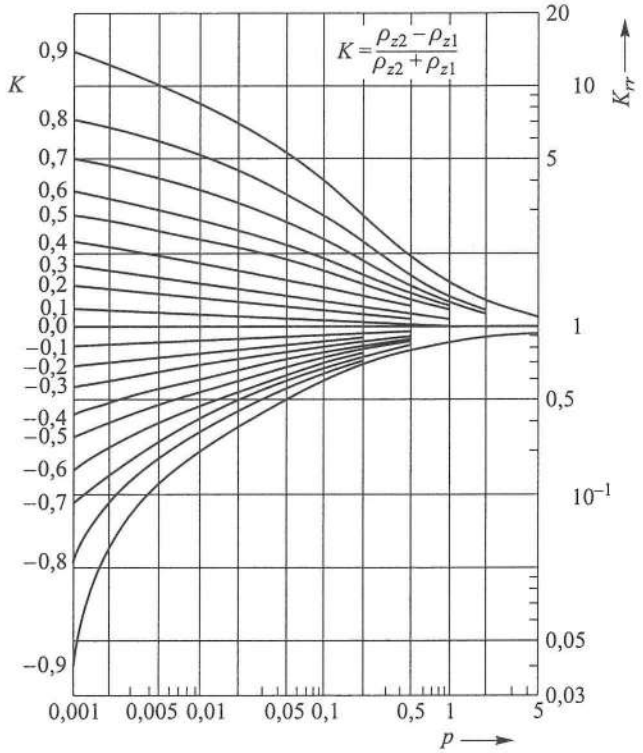
x_A omjer duljine i širine površine A ($x_A = a/b$)

H debljina gornjeg sloja tla, m

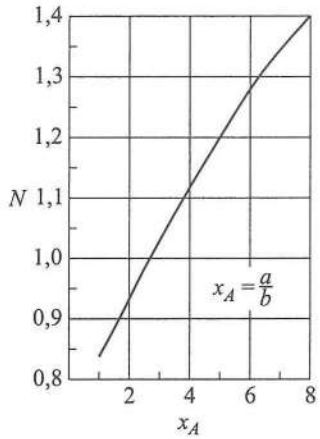
a duljina kombiniranog uzemljivača obuhvaćenog skupinom štapnih uzemljivača, m

b širina kombiniranog uzemljivača obuhvaćenog skupinom štapnih uzemljivača, m.

Pretpostavlja se da mrežasti uzemljivači i skupina štapnih uzemljivača obuhvaća istu površinu A i da mreža i vrhovi štapova leže u istoj ravnini, što je u praksi uobi-



Sl. 8.7–1. Ovisnost K_{rr} o parametru P i K, $p = H/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} < \rho_{z2}$, $P = (H - h)/\sqrt{A}$ za $\rho_{z1} > \rho_{z2}$.



Sl. 8.7–2. Ovisnost N o parametru x_A.

čajen slučaj. U slučaju $\rho_{z1} = \rho_{z2}$, tj. $K_{rr} = 1$, $K_p = 1$, (8.7–2) svodi se na odgovarajuću Schwarzovu formulu [L1]:

$$R_{z\check{S}M} = \frac{\rho_z}{\pi l}\left[\ln\frac{2L}{l} + N + K_1\left(\frac{L}{\sqrt{A}} - \frac{2(x_A+1)}{\sqrt{x_A}}\right)\right] \tag{8.7–3}$$

U slučaju dvoslojnog tla složenost uvjeta koji utječu na međusobni otpor blisko postavljenih mrežastog uzemljivača i skupine štapnih uzemljivača otežava izvođenje dovoljno točne, a jednostavne formule za $R_{z\check{S}M}$. Srećom, nije potrebno zahtijevati veliku točnost formule za $R_{z\check{S}M}$ jer međusobni otpori ne utječu bitno na vrijednost otpora uzemljenja kombiniranoga uzemljivačkog sustava. To se može objasniti činjenicom da $R_{z\check{S}M}$ leži u dosta uskim granicama:

$$\frac{R_{zMR}\cdot R_{zG\check{S}}}{R_{zMR}+R_{zG\check{S}}} \le R_{zZC} \le \min\left(R_{zMR}, R_{zG\check{S}}\right) \tag{8.7–4}$$

Vrijednost $R_{z\check{S}M}$ određuje samo poziciju $R_{z\check{S}M}$ unutar ovih granica. Ako se upotrijebe približne formule za $R_{z\check{S}M}$, treba voditi računa o tome da su fizičke granice za taj parametar:

$$0 \le R_{zZC} \le \min\left(R_{zRM}, R_{zG\check{S}}\right) \tag{8.7–5}$$

Granice po formulama (8.7–4 i 8.7–5) odgovaraju jedna drugoj. Kao što je poznato, provedena je usporedna analiza različitih varijanta formule (8.7–3) da bi se omogućila primjena i u slučaju dvoslojnog tla. Najveća se točnost ostvaruje formulom:

$$R_{z\check{S}MT} = \frac{\rho_{za}}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{l_e} + N\right) + \frac{\rho_{z2}}{\pi L}K_1(0)\left[\frac{L}{\sqrt{A}} - \frac{2(x_A+1)}{\sqrt{x_A}}\right] \tag{8.7–6}$$

gdje je:

$$\rho_{za} = \rho_{z2}\frac{l}{l_e}, \quad l_e = l_2 + l_1\frac{\rho_{z2}}{\rho_{z1}} \tag{8.7–7}$$

ekvivalentna duljina štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu po formuli (8.6–5)

Za jednostruke konture nema drugog člana (8.7–6). Ako $L \to \infty$ (8.7–6) predstavlja otpor uzemljenja vodoravne ploče s parametrima A i $h = 0$ koja leži u homogenom tlu otpornosti ρ_{z2}.

Proveden je niz proračuna otpora uzemljenja kombiniranih uzemljivačkih sustava, zbog provjere (8.6–2), (8.7–2) i (8.7–6). Rezultati su uspoređeni s rezultatima potpunog proračuna. Analizirane su četiri konfiguracije kombiniranih uzemljivačkih sustava, prikazane na slici (8.6–4). Parametri štapnih uzemljivača isti su kao u slučaju analize skupine štapnih uzemljivača. U tablici 8.7–1 dan je kratak pregled dobivenih rezultata. Zapaža se dovoljna točnost približnog proračuna u svim slučajevima. Proširena analiza izvedena za različite vrijednosti mjera ρ_{z1}/ρ_{z2}, H/l i a/l, pokazuje da se taj pristup može smatrati dovoljno točnim. Uvjet $a/l \ge 2$ jedino je ograničenje za primjenu. To je ograničenje u vezi s pretpostavkama usvojenim pri određivanju graničnih vrijednosti samih izraza.

Tablica 8.7–1. Omjer otpora uzemljenja $R_{zŠM}$ izračunanog uporabom formule (8.7–1) (i dijagrama 8.6–1, 8.6–2, 8.6–3, 8.7–1 i 8.7–2) i točnog otpora uzemljenja $R_{zŠMi}$ izračunan uporabom formule (8.7–6) (i svih koeficijenata na računalu) za kombinirani uzemljivač od skupine štapnih i mrežastih uzemljivača prema slici 8.6–4, za a = 50 m i različite vrijednosti H i ρ_{z1}/ρ_{z2}.

$\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}$	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
			a = 50 m, H = 1 m				
C – 4	0,894	0,992	1,003	1,004	0,951	0,951	0,871
C – 9	0,966	1,058	1,082	1,077	1,021	1,021	0,931
C – 25	1,011	1,098	1,140	1,124	1,071	1,071	0,985
C – 41	1,021	1,118	1,164	1,128	1,081	1,081	1,012
			a = 50 m, H = 3 m				
C – 4	0,778	0,892	0,931	1,044	1,019	1,019	0,985
C – 9	0,944	0,995	1,042	1,087	1,087	1,087	1,015
C – 25	1,000	1,076	1,102	1,115	1,115	1,115	1,014
C – 41	1,012	1,037	1,096	1,104	1,104	1,104	0,822
			a = 50 m, H = 5 m				
C – 4	0,719	0,823	0,935	1,003	1,057	1,057	1,147
C – 9	0,967	0,921	1,016	1,074	1,134	1,134	1,227
C – 25	0,941	1,022	1,080	1,112	1,171	1,171	1,201
C – 41	0,923	0,972	1,092	1,091	1,138	1,138	1,091

Učinjen je i pokušaj proširenja primjene empirijske formule za otpor uzemljenja mrežastih uzemljivača u dvoslojnom tlu predložene u [L2] i na slučaj kada uz mrežasti postoje i štapni uzemljivači. Dobiven je sljedeći izraz za takve kombinirane uzemljivačke sustave:

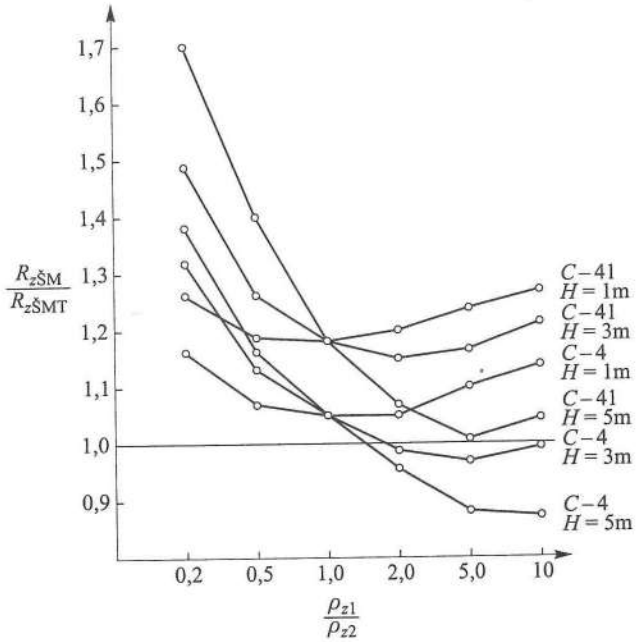
$$R_{zZC} = 0{,}433\frac{\rho_{z2}}{\sqrt{A}}\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{g} + \frac{\rho_{z1}}{L + nl_e} \tag{8.7–8}$$

gdje je:

$$g = \frac{2H}{\sqrt{A} + nl_e} \tag{8.7–9}$$

Pretpostavljeno je da mrežasti uzemljivač leži u gornjem sloju tla. Štapovi leže isključivo u gornjem sloju ili prodiru i u donji sloj. Za $l_1 = l_2 = 0$, (8.7–5) svodi se na prije spomenutu formulu [L2] za uzemljivačke mreže. Vrijednost primjene (8.7–8) provjerena je usporedbom s rezultatima potpunog proračuna za sve prije razmatrane primjere kombiniranih uzemljivačkih sustava, za razne vrijednosti H i omjera ρ_{z1}/ρ_{z2}.

Ta formula daje vrlo točne vrijednosti otpora u slučajevima kada je $\rho_{z1}/\rho_{z2} \geq 1$, a to su slučajevi kada se takvi kombinirani uzemljivački sustavi upotrebljavaju. Dodatna analiza izvedena za različite parametre kombiniranih uzemljivačkih sustava i tla pokazala je da otpor kombiniranog uzemljivača koji se sastoji od štapnih i mreža-



Sl. 8.7–3. Ovisnost omjera otpora uzemljenja $R_{z\check{S}M}$ izračunanog uporabom formule (8.7–8) i točnog otpora uzemljenja $R_{z\check{S}MT}$ u ovisnosti o ρ_{z1}/ρ_{z2} za kombinirani uzemljivački sustav.

Tablica 8.7–2. Izmjerene i izračunane vrijednosti otpora uzemljenja

Transformatorska stanica	Parametri uzemljivačkog sustava				Parametri tla			Otpor uzemljenja, Ω izračunan po formuli		izmjeren
	A, m²	l, m	n	L, m	ρ_{z1}, Ωm	ρ_{z2}, Ωm	H, m	(8.6–3 – 8.7–6)	(8.7–8)	
TS-1	4290	2,5	24	1015	150	30	1,8	0,28	0,33	0,3
TS-2	3150	2,5	25	742	1500 (500)	15	5	2,85 (1,09)	2,04 (0,78)	0,8
TS-3	3080	2,5	21	821	500	130	3,7	2,12	1,61	1,4
TS-4	8200	2,5	50	2170	4200	240	2,6	2,71	2,57	1,75
TS-5 prije rekonstrukcije	2840	5	44	610	2100	60	18	9,07	3,33	7
TS-5 poslije rekonstrukcije	2840	20	8	610	2100	60	18	1,84	1,84	2,4
TS-6	1760	5	22	715	100	64	1,5	0,81	0,79	0,48
TS-7 ljeto	300	2,25	25	175	40	20	1,5	0,57	0,67	0,6
TS-7 zima	300	2,25	25	175	260	20	1,5	0,64	0,86	0,8
TS-8	2800	5	24	760	1600	400	0,9	4,04	4,65	4,2
TS-9	375	2,25	42	260	1000	110	3,35	6,58	5,69	5

stog uzemljivača izračunan po formuli (8.7–8) daje dovoljno točne vrijednosti otpora uzemljenja za praktičnu primjenu ako su zadovoljeni uvjeti:

$$\frac{H}{\sqrt{A}} \leq 0{,}4, \quad \frac{\sqrt{A}}{l} \geq 4, \quad \frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}} \geq 0{,}5 \tag{8.7–10}$$

Ti su izrazi provjereni i uspoređivanjem s izmjerenim vrijednostima otpora uzemljenja niza realnih uzemljivača [L4, L5] kao što je prikazano u tablici 8.7–2.

Literatura

[L1] Schwarz, S. J.: *Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Systems*, AIEE Transactions, vol 73, pp 1011–1016, August 1954.

[L2] Nahman, J., Salamon, D.: *Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Grids in Nonuniform Soil*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS – 103, pp 880–885, April 1984.

[L3] Nahman, J.: *Digital Calculation of Erthing Systems in Nonuniform Soil*, Archiv für Elektrotechnik, vol 62, pp 19–24, 1980.

[L4] Jakobs, A. J.: *Przvedenie mnogosloznoi electricheskoi struktury zemly k ekvivalentnoi dvuhsloynoi pry reschote sloznyh zazemlitelei*, Electrichestvo, No 8, pp 19–23, 1970.

[L5] – *Discussion of the Paper of Katygroba*, Electrichestvo, no. 8, pp 72–73, 1981.

9. PRSTENASTI UZEMLJIVAČI

9.1. POJEDNOSTAVNJENI IZRAČUN OTPORA UZEMLJENJA

Kod prstenastih uzemljivača kružnog oblika kojima je promjer D_p veći od 30 m otpor uzemljenja R_z računa se po približnom izrazu (6.3–9) koji vrijedi za trakaste uzemljivače. Pri tome se za duljinu uzemljivača u taj izraz umjesto l uvrsti D_p pa je:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi^2 D_p} \ln \frac{2\pi D_p}{d} \tag{9.1–1}$$

gdje je:

D_p promjer prstenastog uzemljivača, m

d promjer okruglog vodiča od kojega je izveden prstenasti uzemljivač, m.

Za prstenaste uzemljivače koji nisu kružnog oblika otpor uzemljenja R_z može se izračunati tako da se nađe promjer D_p kruga koji ima jednaku površinu kao i promatrani prstenasti uzemljivač:

$$D_p = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{9.1–2}$$

gdje je:

D_p promjer nadomjesnoga prstenastog uzemljivača,

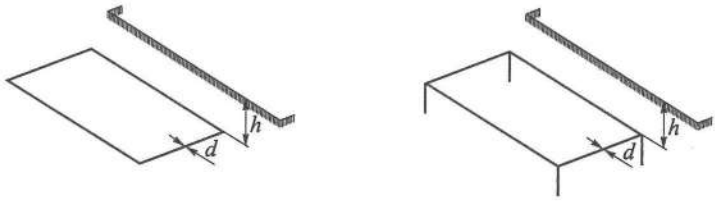
A površina koju zatvara uzemljivač bilo kakva oblika, m^2

i zatim D_p uvrsti u formulu:

$$R_z = \frac{2\rho_z}{3D_p} \tag{9.1–3}$$

Ta formula vrijedi za uzemljivače kojima je promjer $D_p > 30$ m.

Prstenasti uzemljivači četverokutnog oblika, slika 9.1–1, sastavljeni od traka, najviše se upotrebljavaju za uzemljenje objekta na slobodnom zemljištu, i to tako da okružuju objekt ili skupinu uređaja.



a) b)

Sl. 9.1–1. a) Prstenasti uzemljivači četverokutnog oblika
b) sa štapnim uzemljivačima.

Ako se s L označi opseg četverokuta, s d promjer vodiča i s h dubina ukopa, otpor uzemljenja takva uzemljivača računa se prema izrazu, [2] i [35]:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L} \ln \frac{1{,}27L}{\sqrt{hd}} \tag{9.1–4}$$

Također je moguće kombinirati prstenasti uzemljivač i štapne uzemljivače, kako je to prikazano na slici 9.1–1.b). Izraz za računanje otpora rasprostiranja četverokutnog uzemljivača kojemu su dodani štapni uzemljivači složeniji je od izraza (9.1–4). Može se izračunati kao paralelni otpor sastavljen od otpora uzemljenja skupine štapnih uzemljivača i jednoga prstenastog uzemljivača.

Kad se postavlja četverokutni uzemljivač, valja paziti na to da on unutar površine što je zatvara obuhvati sve metalne dijelove koje je potrebno uzemljiti. Pritom još je bitno da je udaljen od svih tih dijelova barem 1 m. Osim toga, prijeko je potrebno da je sabirni zemljovod koji prikuplja sva uzemljenja spojen za četverokutni uzemljivač barem na dva mjesta i to na suprotnim stranama četverokuta.

9.2. TOČNIJI IZRAČUN OTPORA UZEMLJENJA

Točniji izračun otpora uzemljenja četverokutnog uzemljivača ide po formuli [11]:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left(\ln \frac{2L}{h'} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right) \tag{9.2–1}$$

gdje su:

K_{pr} i $K_{pš}$ faktori koji se mogu očitati sa slika 9.2–1 i 9.2–2 za navedene uvjete pravokutnog izmjenjivača

L ukupna duljina pravokutnog uzemljivača, m

A površina uzemljivača, m^2

$R_z = \dfrac{\rho_z}{K_{pr}}$, $K_{pr} = \dfrac{1}{\pi L}\left(\ln\dfrac{2L}{h'} + K_1\dfrac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right)$, ili slika 9.2–1 za navedene parametre

$R_z = \dfrac{\rho_z}{K_{prš}}$, $K_{prš}$ faktor slika 9.2–2, za navedene parametre

K_1 i K_2 faktori koji ovise o omjeru duljine stranice i dubine ukopa uzemljivača (za kvadratne uzemljivače može se uzeti bez obzira na dubinu ukopa da su: $K_1 = 1{,}37$ i $K_2 = 5{,}64$ [11])

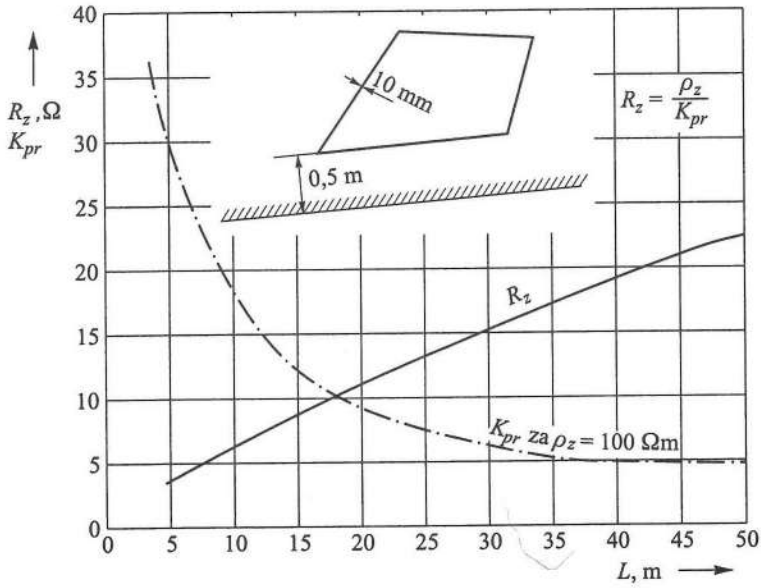
h' ekvivalentna dubina ukopa, $h' = \sqrt{dh}$ ako je $h > 0$, za dubinski uzemljivač, m

$h' = \dfrac{d}{2}$ ako je $h = 0$, za površinski uzemljivač, m

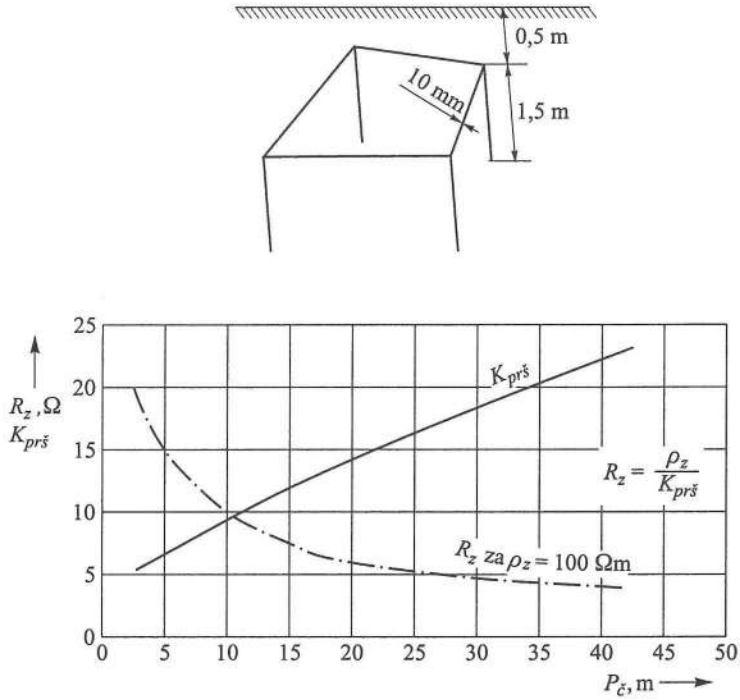
h dubina ukopa uzemljivača, m

d promjer vodiča uzemljivača (za trakasti uzemljivač prema [2] iznosi 1/2 širine trake, m.

Za četverokutni uzemljivač od okruglog željeza promjera 10 mm bez štapnog uzemljivača i s njim upotrebljavaju se dijagrami na slikama 9.2–1 i 9.2–2, za otpor uzemljenja i faktore K_{pr} i $K_{prš}$.



Sl. 9.2–1. Otpor uzemljenja i faktor K_{pr} četverokutnog uzemljivača od okruglog željeza promjera 10 mm, u ovisnosti o ukupnoj duljini, za dubinu ukopa 0,5 m i otpornost tla $\rho_z = 100$ Ωm.



Sl. 9.2–2. Otpor uzemljenja i faktor $K_{prš}$ četverokutnog uzemljivača od okruglog čelika promjera 10 mm s četiri štapna uzemljivača, za dubinu ukopa od 0,5 m, te za duljinu štapnih izmjenjivača od 1,5 m i otpornost tla ρ_z = 100 Ωm.

Primjer 9A

Izračunajte otpor uzemljenja prstenastog uzemljivača promjera D = 55,28 m, izvedenog od trake Fe/Zn 25 × 4 mm ukopanog u zemlju otpornosti ρ_z = 100 Ωm, i to: po formuli (6.3–9) kao trakastog uzemljivača, po formuli (9.1–1) kao prstenastog uzemljivača i po formuli (9.1–2) kao pravokutnog uzemljivača dimenzija 40 × 60 m za koji je ekvivalentni promjer D_p = 55,28 m.

Otpor uzemljenja trakastog uzemljivača po formuli (6.3–9):

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi l}\ln\frac{2l}{d} = \frac{100}{\pi(40+60)2}\ln\frac{2\cdot 200}{0{,}0125} = 1{,}651\,\Omega$$

Otpor uzemljenja prstenastog uzemljivača po formuli (9.1–1):

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi^2 D}\ln\frac{2\pi D}{d} = \frac{100}{\pi^2\cdot 55{,}28}\ln\frac{2\pi\cdot 55{,}28}{0{,}0125} = 1{,}875\,\Omega$$

Otpor uzemljenja pravokutnog uzemljivača, računajući kao prstenasti uzemljivač, po formuli (9.1–2):

$$R_z = \frac{2\rho_z}{3D_p} = \frac{2 \cdot 100}{3 \cdot 55{,}28} = 1{,}206\ \Omega$$

Uvjet za primjenu formule (9.1–2) je $D > 30$ m, što je u ovom primjeru zadovoljeno. Izračun otpora uzemljenja po formuli (9.1–2), računajući pravokutni uzemljivač kao prstenasti, znatno odstupa od izračuna po formuli (6.3–9) za trakasti i po formuli (9.1–1) za prstenasti uzemljivač. Omjeri su: 1,206 (pravokutni) : 1,651 (trakasti) : 1,875 (prstenasti). Dosta su blizu izračuna četverokutnog uzemljivača po formuli (9.1–3) ($R_z = 1{,}285\ \Omega$) i po formuli (9.2–1) ($R_Z = 1{,}35\ \Omega$) (v. primjer 9B).

Primjer 9B

Izračunaj otpor uzemljenja četverokutnog uzemljivača primjenom formule (9.1–4) i (9.2–1) za sljedeće podatke:

- trakasti uzemljivač 25 mm × 4 mm
- dubina ukopa $h = 0{,}5$ m
- duljina stranica pravokutnika 60 m × 40 m.

Otpor uzemljenja po formuli (9.1–4):

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L} \ln \frac{1{,}27 \cdot L}{\sqrt{hd}} = \frac{100}{\pi \cdot 200} \ln \frac{1{,}27 \cdot 200}{\sqrt{0{,}5 \cdot 0{,}0125}} = 1{,}285\ \Omega$$

Otpor uzemljenja po formuli (9.2–1):

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left(\ln \frac{2L}{\sqrt{hd}} + \frac{K_1 L}{\sqrt{A}} - K_2\right) =$$

$$= \frac{100}{\pi \cdot 200}\left(\ln \frac{2 \cdot 200}{\sqrt{0{,}5 \cdot 0{,}0125}} + \frac{1{,}37 \cdot 200}{\sqrt{2400}} - 5{,}64\right) = 1{,}35\ \Omega$$

Razlika iznosi 1,35 – 1,285 = 0,065 Ω ili 5,1 % u odnosu na vrijednost otpora po formuli (9.1–3), što je za praktične izračune zanemarivo.

10. MREŽASTI UZEMLJIVAČI

Mrežasti uzemljivači upotrebljavaju se u prvome redu kao uzemljivači transformatorskih stanica najviših napona (110, 220 i 380 kV) s izravnim uzemljenjem neutralne točke, gdje su velike struje zemljospoja (reda nekoliko kA). U tim postrojenjima, za sigurnost ljudi od opasnoga dodirnog napona i napona koraka potrebno je ostvariti mali otpor uzemljenja i nestrmu razdiobu potencijala kako na površini iznad mrežastog uzemljivača, tako i na površini koja graniči s površinom mrežastog uzemljivača.

Mrežasti uzemljivači mogu imati pravilnu geometriju, recimo s oknima mreže duljine i širine između 5 i 20 m, ili pak nepravilnu geometriju koja proizlazi iz spajanja više jednostavnih uzemljivača (neravnomjerno raspoređenih) različitih veličina. Također u mrežaste uzemljivače svrstavaju se uzemljivači sastavljeni od više paralelnih vodiča. Mnogi autori u mrežaste uzemljivače svrstavaju i kombinirane uzemljivače sastavljene od trakastih i štapnih uzemljivača.

U mnogim industrijskim pogonima nalaze se različite kombinacije trakastih i prstenastih uzemljivača, koji su spojeni u jednu cjelinu, kao što je združeni uzemljivač (gromobranskog, radnog i zaštitnog uzemljenja) koji je po svojoj konfiguraciji vodiča mrežasti uzemljivač s nepravilnom konfiguracijom pojedinih dijelova.

Dubina ukopa mrežastog uzemljivača može biti različita. Prema dubini ukopa mogu se svrstati u površinske uzemljivače s dubinom ukopa $h \leq 4$ cm (kako je to predloženo s dokazom u poglavlju 6.3) i u dubinske uzemljivače s ustaljenom dubinom ukopa od 0,5 m do 1 m, pa i za veću dubinu ukopa, a što sve ovisi o vrsti tla i dubini smrzavanja tla.

10.1. TEORIJSKE PODLOGE ZA PRIBLIŽNI PRORAČUN OTPORA UZEMLJENJA MREŽASTIH UZEMLJIVAČA

10.1.1. Primjena Ollendorf-Laurentove formule

Prema [22] približni otpor uzemljenja mrežatog uzemljivača (ne uzimajući u obzir dubinu ukopa h) može se izračunati po poznatoj Ollendorf-Laurentovoj formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2D_r} + \frac{\rho_z}{L}, \quad \Omega \tag{10.1–1}$$

$$D_r = 1{,}13\sqrt{A}, \quad \text{m} \tag{10.1–2}$$

gdje je:

L ukupna duljina vodiča mrežastog uzemljivača, m
D_r računski promjer opsega mrežastog uzemljivača, m
A površina mrežastog uzemljivača, m^2
b širina mrežastog uzemljivača, m
l duljina mrežastog uzemljivača, m
h dubina ukopa mrežastog uzemljivača, m
D promjer pločastog uzemljivača, m.

Ta formula vrijedi uz sljedeće uvjete:

a) širina uzemljivača b jednaka je ili veća od polovice duljine l mrežastog uzemljivača, $b \geq l/2$,
b) računski promjer mrežastog uzemljivača $D_r \geq 100$ m,
c) dubina ukopa $h \leq 1$ m, s tim da je formula (10.1–1) točna za uzemljivač na površini zemlje ($h = 0$) i približno točna za dubine ukopa do 1 m,
d) vodiči mrežastog uzemljivača približno su ravnomjerno raspoređeni po površini tla.

10.1.2. Približni proračun za različite dubine ukopa [22]

Povećanjem duljine vodiča mrežastog uzemljivača L smanjuje se omjer ρ_z/L te formula (10.1–1) pri $L \to \infty$ prelazi u oblik za izračun otpora uzemljenja pločastog uzemljivača $R_z = \rho_z/2D$.

Za realne vrijednosti L, h i D_r i za približni izračun otpora uzemljenja pretpostavljajući da je mrežasti uzemljivač oblika kružne ploče, otpor uzemljenja iznosi:

$$R_z = 0{,}5(1+\delta)\left(\frac{\rho_z}{2D_r} + \frac{\rho_z}{L}\right), \quad \Omega \tag{10.1–3}$$

$$\delta = f(q_1), \quad q_1 = 0{,}5 + \frac{4h}{D_r} \tag{10.1–4}$$

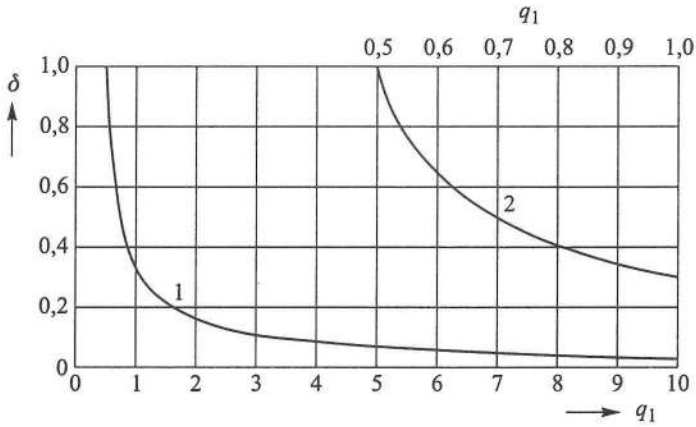
gdje je:

δ faktor koji ovisi o koeficijentu q_1 prema formuli (10.1–4) i dijagramu na slici 10.1–1.

Ta formula vrijedi uz sljedeće uvjete:

a) širina mrežastog uzemljivača veća je od duljine mrežastog uzemljivača, $b \geq l$
b) vodiči mrežastog uzemljivača približno su ravnomjerno raspoređeni po površini tla

c) dubina ukopa h bilo je koja, uključujući i $h = 0$ s tim da za dubinu ukopa $h = 0$ treba pretpostaviti da se radi s površinskim uzemljivačem gdje je $h \leq 4$ cm jer se u stvarnosti ne može izvesti površinski uzemljivač s dubinom ukopa $h = 0$ jer bi u tom primjeru uzemljivač bio u zraku, a ne u tlu.



Sl. 10.1–1. Vrijednosti faktora δ u ovisnosti o faktoru q_1 za proračun otpora uzemljenja pločastog uzemljivača.

10.1.3. Opća formula za približni proračun otpora mrežastog uzemljivača

$$R_z = \frac{0{,}55\rho_z}{\sqrt{A}}, \quad \Omega \tag{10.1–5}$$

Ta se formula može primijeniti pod uvjetom da je razmak vodiča mrežastog uzemljivača a prema duljini mrežastog uzemljivača l:

$$\frac{a}{l} \leq 0{,}2 \tag{10.1–6}$$

10.1.4. Približni proračun otpora mrežastog uzemljivača oblika vodoravne plohe

Prema [4] otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača koji se sastoji od paralelnih vodiča na međusobnoj udaljenosti od 1,5 m do 6 m i ukopanih u dubinu od 0,3 m do 1,5 m (kako je to često u praksi) može se izračunati po formuli za pločasti uzemljivač:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2D_r} \qquad D_r = \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} \qquad R_z = \frac{\rho_z\sqrt{\pi}}{4\sqrt{A}} \tag{10.1–7}$$

gdje je:

D_r računski promjer mrežastog uzemljivača, pretpostavlja se da je u obliku vodoravne plohe, tj. promjer kruga čija je površina jednaka površini mrežastog uzemljivača, m.

U tom primjeru polazi se od pretpostavke da je dubina ukopa mrežastog uzemljivača h mnogo manja od duljine l, $h \ll l$ i da nije važan oblik mrežastog uzemljivača (pravokutan, kvadratan i sl.).

10.2. TEORIJSKE PODLOGE ZA TOČNIJI PRORAČUN OTPORA UZEMLJENJA MREŽASTIH UZEMLJIVAČA

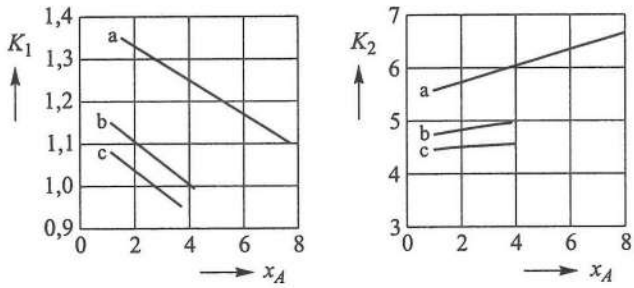
10.2.1. Proračun za različite dubine ukopa

Prema [2] otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača za različite dubine ukopa h i omjera duljine i širine mrežastog uzemljivača $x_A = l/b$ može se dovoljno točno izračunati po formuli:

$$R_z = \frac{0{,}318\rho_z}{L}\left(\ln\frac{20\cdot L}{\sqrt{d\cdot h}} + K_1\frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right) \qquad (10.2\text{–}1)$$

gdje je:

- d računski promjer vodiča i za trakasti uzemljivač jednak je polovici širine trake, m
- h srednja dubina ukopa vodiča uzemljivača, m
- x_A omjer duljine i širine mrežastog uzemljivača, $x_A = l/b$
- L ukupna duljina vodiča uzemljivača, m
- A površina uzemljivača, m^2
- K_1 faktor $K_1 = f(x_A)$, slika 10.2–1
- K_2 faktor $K_2 = f(x_A)$, slika 10.2–1.



krivulja a: $\frac{h}{\sqrt{A}} = 0$ krivulja b: $\frac{h}{\sqrt{A}} = 0{,}1$ krivulja c: $\frac{h}{\sqrt{A}} = 0{,}167$

Sl. 10.2–1. Faktori K_1 i K_2 za proračun mrežastog uzemljivača.

10.2.2. Proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu prema Laurentovoj formuli

Za uzemljivače u nehomogenom tlu mora se pored geometrijskih parametara uzemljivača, uzeti u obzir i struktura tla s različitom otpornošću slojeva tla.

Laurent je predložio formulu [L1] za proračun otpora uzemljenja vodoravnog mrežastog uzemljivača položenog u gornji sloj otpornosti tla ρ_{z1} ispod kojeg je drugi sloj otpornosti tla ρ_{z2}:

$$R_z = \frac{\rho_{z2}}{2D_r} + \frac{\rho_{z1}}{L} \tag{10.2–2}$$

Za pravokutni ili kvadratni mrežasti uzemljivač

$$D_r = 1{,}13\sqrt{A} \tag{10.2–3a}$$

a za kružnu ploču:

$$D_r = D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{10.2–3b}$$

Ta formula vrijedi uz sljedeće uvjete:

a) debljina gornjeg sloja tla H znatno je manja od duljine l mrežastog uzemljivača, $H \ll l$
b) otpornost tla gornjeg sloja ρ_{z1} veća je od otpornosti tla ρ_{z2} donjeg sloja, $\rho_{z1} \geq \rho_{z2}$ ili mu je jednaka.

U literaturi [L2] za iste uvjete dana je formula za proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača promatrajući ga kao kombinaciju mrežastog i prstenastog uzemljivača:

$$R_z = 1{,}6\frac{\rho_{z2}}{P} + 0{,}6\frac{\rho_{z1}}{L}, \quad \Omega \tag{10.2–4}$$

P je vanjski opseg mrežastog uzemljivača, m.

U slučaju da nije ispunjen uvjet $H \ll L$, preporučuje se sljedeća formula za proračun otpora uzemljenja:

$$R_z = 1{,}6\frac{\rho_{z2}}{P} + 0{,}6\frac{\rho_{z1}}{L} + \rho_{z1}\frac{H}{A}, \quad \Omega \tag{10.2–5}$$

Ta formula proširuje formulu (10.2–4) članom $\rho_{z1} \cdot H/A$ koji približno uzima u obzir pad napona prouzrokovan strujom uzemljivača pri prolazu iz gornjeg u donji sloj tla.

10.2.3. Poboljšanje Laurentove formule

Poboljšana Laurentova formula uvodi korekciju kojom se obuhvaća utjecaj debljine gornjeg sloja H otpornosti tla ρ_{z1} s faktorom g:

$$R_z = \frac{\rho_{z2}}{2D_r}\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^g + \frac{\rho_{z1}}{L} \tag{10.2–6}$$

$$g = \frac{2H}{\sqrt{A}} \tag{10.2–7}$$

10.2.4. Proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu

Proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu računa se po formuli:

$$R_z = \left[0{,}53\frac{\rho_{z2}}{\sqrt{A}}\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^g + \frac{\rho_{z1}}{L\sqrt[3]{m}}\right]\cdot\left[1 - 0{,}8\left(\frac{100h\cdot d}{\sqrt{A}}\right)^{0{,}25}\right] \tag{10.2–8}$$

gdje je:

$m = \sqrt{M} + 1$

M broj okana mrežastog uzemljivača.

10.2.5. Proračun otpora uzemljenja u dvoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule

Promatramo pravokutni mrežasti uzemljivač površine A ukopan u dubinu h u dvoslojno tlo debljine gornjeg sloja H otpornosti ρ_{z1} i donjeg sloja otpornosti ρ_{z2}.

Formula za proračun otpora uzemljenja mora zadovoljiti uvjet:

$$\lim_{\frac{L}{\sqrt{A}}\to\infty} R_z = K_p K_1 \frac{\rho_{z1}}{\sqrt{A}} \tag{10.2–9}$$

gdje je:

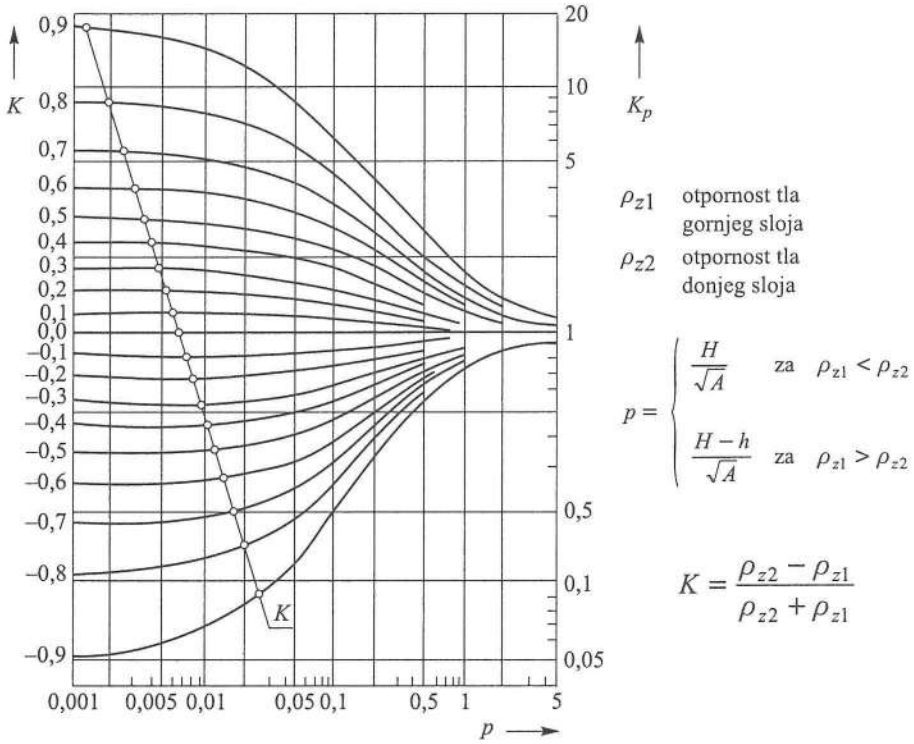
K_p korekcijski faktor, $K_p = f(K, p)$ zbog nehomogenosti tla za horizontalni pločasti uzemljivač površine A i dubine ukopa h očita se iz dijagrama na slici 10.2–2

K_1 koeficijent ploče za homogeno tlo, $K_1 = f(x_A)$, za pojedine omjere $h/\sqrt{A}$, očita se iz dijagrama na slici 10.2–1.

Najveći otpor uzemljenja, po formuli (10.2–9), ima jednokonturna mreža, tj. mrežasti uzemljivač s najmanjom mogućom gustoćom vodiča, to je ustvari prstenasti uzemljivač:

$$\frac{L}{\sqrt{A}} = \frac{2(x_A + 1)}{\sqrt{x_A}}$$

Najmanji otpor uzemljenja, po formuli (10.2–9), dobije se za neizmjernu gustoću vodiča, tj. mrežasti uzemljivač prelazi u pločasti vodoravni uzemljivač, te je: $L/\sqrt{A} = \infty$.



Sl. 10.2–2. Ovisnost faktora K_p o parametru p za određene vrijednosti omjera K.

Za dovoljno točan proračun otpora uzemljenja jednokonturne mreže mrežastog uzemljivača, formula (10.2–9) mora zadovoljiti uvjet [L4]:

$$\lim_{\frac{L}{\sqrt{A}} \to \frac{2(x_A+1)}{\sqrt{x_A}}} R_z = K_{rr} \frac{\rho_{z1}}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{h'} + N - 1\right) \qquad (10.2\text{–}10)$$

gdje je:

K_{rr}	korekcijski faktor zbog nehomogenosti tla, dijagram na slici 10.2–3
A	površina mrežastog uzemljivača, m^2
$h' = \sqrt{h \cdot d}$	za mrežasti uzemljivač na površini tla $h' = d/2$
h	dubina ukopa, m
d	promjer mrežastog uzemljivača, m
N	geometrijski faktor, $N = f(x_A)$, dijagram na slici 10.2–4.

Za mrežasti uzemljivač na površini tla $h' = d/2$

Korekcijski faktor K_{rr} može se izračunati po formuli:

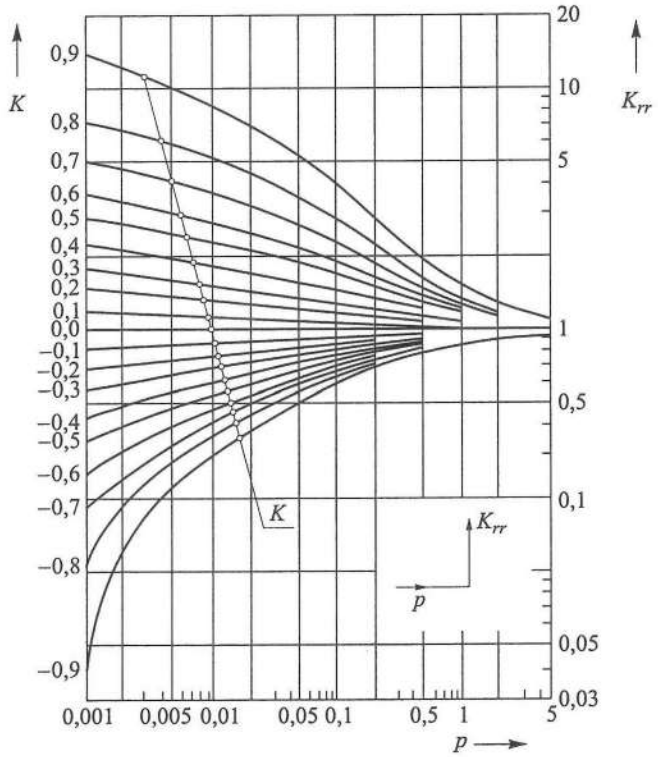
$$K_{rr} = 1 + \frac{2}{c}\sum_{n=1}^{\infty} k^n \cdot q \cdot k(q) \qquad (10.2\text{–}11)$$

$$c = \ln\left(\frac{8}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{A}}{h'}\right) \tag{10.2–12}$$

Ta formula izvedena je za mrežasti uzemljivač oblika prstena površine A s vodičima promjera d i dubine ukopa h. Faktor $k(q)$ u formuli (10.2–11) označuje eliptički integral prve vrste s parametrom q:

$$q = \left[1 + \pi(np)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{10.2–13}$$

n je broj slojeva višeslojnog tla.

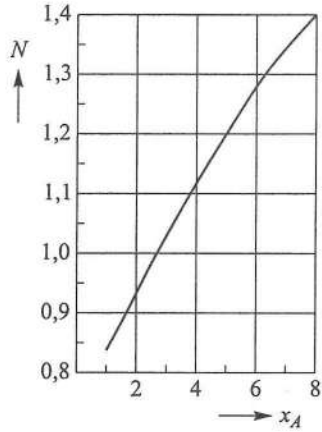


Sl. 10.2–3. Ovisnost faktora K_{rr} o parametru p za određene vrijednosti omjera k i za $c = 8$.

Konačno dolazimo do poboljšane Laurentove formule za proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača koja zadovoljava uvjete definirane u formulama (10.2–9) i (10.2–10) za višeslojno tlo:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left\{k_p k_1\left[\frac{L}{\sqrt{A}} - \frac{2(x_A+1)}{\sqrt{x_A}} + k_{rr}\left(\ln\frac{2L}{h'} + N - 1\right)\right]\right\} \tag{10.2–14}$$

gdje je N parametar ovisan o x_A, definiran kao geometrijski parametar mrežastog uzemljivača i predstavlja omjer duljine i širine mrežastog uzemljivača $x_A = l/b$, a može se očitati iz dijagrama na slici 10.2–4.



Sl. 10.2–4. Ovisnost N o parametru x_A.

10.2.6. Proračun otpora uzemljenja u jednoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule [32]

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{h'} + K_1\frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right) \qquad (10.2\text{–}15)$$

gdje je:

K_1, K_2 korekcijski faktori koji ovise o geometriji mrežastog uzemljivača i mogu se očitati iz dijagrama na slici 10.2–1

$h' = \sqrt{d \cdot h}$.

Za uzemljivač na površini tla je $h' = d/2$.

10.2.7. Proračun otpora uzemljenja u jednoslojnom tlu uporabom formule prema [32]

Ta se formula upotrebljava za dubine ukopa od 0,25 m do 2,5 m. Parametri L, A, h isti su kao u ostalim formulama ovog poglavlja.

$$R_z = \rho_z\left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}}\right)\right], \quad \Omega \qquad (10.2\text{–}16)$$

10.3. DOPUŠTENI DODIRNI NAPON I NAPON KORAKA

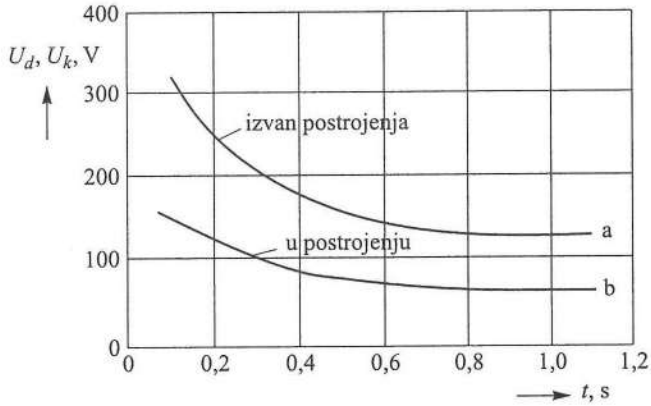
Zaštitno djelovanje uzemljivača očituje se s naponom uzemljivača putem prekomjernog dodirnog napona U_d i napona koraka U_k. Kao što je poznato, dodirni napon U_d razlika je potencijala između točke dodira (uzemljenog uređaja) i čovjeka na udaljenosti od 1 m pri nastanku zemnog spoja. Napon koraka U_k razlika je potencijala između dvije noge (koraka) pri razmaku od 1 m. Za utvrđivanje dopuštenog dodirnog napona i napona koraka važno je i vrijeme trajanja zemljospoja. To je vrijeme namještanja zemljospojne zaštite (obično do 0,5 sekundi u mrežama s uzemljenom neutralnom točkom).

Dopušteni dodirni napon i napon koraka očitava se iz dijagrama na slici 10.3–1. Dopušteni napon dodira i koraka ovisi i o čovjekovoj masi, otpornosti tla gornjeg sloja ρ_{z1}, faktoru C_p kojim se smanjuje utjecaj gornjeg sloja tla u ovisnosti o njegovoj debljini [73]:

$$C_p = \frac{1}{0{,}96}\left[1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nH}{0{,}08}\right)^2}}\right] \qquad (10.3\text{–}1)$$

gdje je:

- C_p faktor kojim se smanjuje utjecaj gornjeg sloja tla u ovisnosti o njegovoj debljini, za izračun dodirnog napona i napona koraka
- n broj slojeva višeslojnog tla
- H debljina gornjeg sloja tla, m
- K faktor za dvoslojno tlo, slika 8.6–2.



Sl. 10.3–1. Dopušteni napon dodira i koraka za postrojenja s djelotvorno uzemljenom neutralnom točkom [L1].

Dopušteni napon dodira za čovjeka, normiran za masu od 70 kg iznosi:

$$U_{dd} = \left(1000 + 6 \cdot C_p \cdot \rho_{z1}\right) \cdot 0{,}157\sqrt{t}, \quad \text{V} \tag{10.3–2}$$

Dopušteni napon koraka također za masu čovjeka 70 kg iznosi:

$$U_{kd} = \left(1000 + 1{,}5 \cdot C_p \cdot \rho_{z1}\right) \cdot 0{,}157\sqrt{t}, \quad \text{V} \tag{10.3–3}$$

gdje je:

t vrijeme trajanja zamljospoja, s

1000 najniža vrijednost otpora ljudskog tijela, odabrana na osnovi istraživanja, iznosi 1000 Ω

0,157 faktor za masu ljudskog tijela od 70 kg, a za manju taj je faktor 0,116

Prema [73] moguće je jednostavnim i manje točnim proračunom izračunati najveće dopuštene vrijednosti napona dodira i koraka po formulama:

$$\begin{aligned} U_{dm} &= 0{,}8 \cdot \rho_z \cdot \frac{I_z}{L}, \quad \text{V} \\ U_{km} &= 0{,}15 \cdot \rho_z \cdot \frac{I_z}{L}, \quad \text{V} \end{aligned} \tag{10.3–4}$$

gdje je:

U_{dm} najveća dopuštena vrijednost dodirnog napona

U_{km} najveća dopuštena vrijednost napona koraka

L ukupna duljina vodiča uzemljivača, m

I_z struja zemljospoja, A.

Primjer 10A

Za mrežasti uzemljivač sljedećih podataka:

- površina mrežastog uzemljivača $A = 50 \cdot 80 = 4\,000$ m^2
- vanjske dimenzije uzemljivača: duljina $l = 80$ m, širina $b = 50$ m
- otpornost jednoslojnog tla $\rho_z = 100$ Ωm
- dubina ukopa ili prosječna dubina ukopa vodiča mrežastog uzemljivača $h = 0{,}8$ m
- presjek okruglog vodiča $S_{Cu} = 70$ mm^2
- međusobni razmak paralelnih vodiča mrežastog uzemljivača $a = 5$ m

treba izračunati otpor uzemljenja primjenom navedenih formula za približni i točni proračun, te analizirati rezultate.

10.A.1. Otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom približne formule (10.1–5):

$$R_z = \frac{0{,}55\rho_z}{\sqrt{A}} = \frac{0{,}55 \cdot 100}{\sqrt{4\,000}} = 0{,}87\ \Omega$$

Ispunjen je uvjet za uporabu te formule jer je omjer $a/l = 5/80 \leq 0{,}2$.

10.A.2. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom približne formule (10.1–1):

$$R_z = \frac{\rho_z}{2D_r} + \frac{\rho_z}{L} = \frac{100}{2 \cdot 71{,}462} + \frac{100}{1730} = 0{,}76\ \Omega$$

gdje je:

- ukupna duljina vodiča uzemljivača $L = 11 \cdot 80 + 17 \cdot 50 = 1730$ m (za razmak vodiča $a = 5$ m po širini $b = 50$ m potrebno je ugraditi 11 vodiča duljine $11 \cdot 80 = 880$ m; za isti razmak po duljini $l = 80$ m potrebno je ugraditi 17 vodiča duljine $17 \cdot 50 = 850$ m)
- ekvivalentni računski promjer mrežastog pravokutnog uzemljivača površine $A = 4000\ \text{m}^2$:

$$D_r = 1{,}13\sqrt{A} = 1{,}13\sqrt{4000} = 71{,}467\ \text{m}.$$

Za uporabu ove formule zadovoljeni su uvjeti:

a) $b \geq l/2 \rightarrow 50 \geq 80/2$, b) $h \leq 1\ \text{m} \rightarrow 0{,}8 < 1\ \text{m}$

ali nije zadovoljen uvjet $D_r \geq 100$ m, jer je $71{,}47\ \text{m} < 100\ \text{m}$.

10.A.3. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom približne formule (10.1–3):

$$R_z = 0{,}5(1+\delta)\left(\frac{\rho_z}{2D_r} + \frac{\rho_z}{L}\right)$$

Faktor $\delta = f(q_1)$ očitava se iz dijagrama na slici 10.1–1 za parametar q_1:

$$q_1 = 0{,}5 + \frac{4h}{D_r} = 0{,}5 + \frac{4 \cdot 0{,}8}{71{,}467} = 0{,}545$$

$$\delta = 0{,}85$$

te je:

$$R_z = 0{,}5(1+0{,}85)\left(\frac{100}{2 \cdot 71{,}467} + \frac{100}{1730}\right) = 0{,}70\ \Omega.$$

10.A.4. Proračun otpora mrežastog uzemljivača po približnoj formuli (10.1–7) (kao da je vodoravni pločasti izmjenjivač):

$$R_z = \frac{\rho_z}{2D_r}, \quad \frac{D_r^2\pi}{4} = A$$

$$D_r = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 71{,}37\text{m}$$

$$R_z = \frac{100}{2 \cdot 71{,}37} = 0{,}70\Omega$$

Iz proračuna se vidi da je mala razlika između promjera D vodoravnog pločastog uzemljivača površine $4000\ \text{m}^2$ i računskog ekvivalentnog promjera D_r pravokutnog uzem-

ljivača jednake površine jer je $D = 71{,}37$ m a $D_r = 71{,}47$ m, te su neznatne razlike i otpora uzemljenja.

10.A.5. Proračun otpora mrežastog uzemljivača uporabom točnije formule (10.2–1):

$$R_z = \frac{0{,}318\rho_z}{L}\left(\ln\frac{20\cdot L}{\sqrt{d\cdot h}} + K_1\frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right)$$

Treba izračunati parametre d, K_1 i K_2.

Promjer vodiča presjeka 70 mm^2 iznosi:

$$d = \frac{2\sqrt{70}}{\sqrt{\pi}} = 9{,}44 \text{ mm} = 0{,}00944 \text{ m}$$

Faktori K_1 i K_2 očitavaju se iz dijagrama na slici 10.2–2 za omjer $x_A = l/b = 80/50 = 1{,}6$ i omjer $h/\sqrt{A} = 0{,}8/\sqrt{4\,000} = 0{,}013$, krivulja b. Dobiva se $K_1 = 1{,}108$ i $K_2 = 4{,}58$ pa uvršta-vanjem slijedi:

$$R_z = \frac{0{,}318\cdot 100}{1\,730}\left(\ln\frac{20\cdot 1\,730}{\sqrt{0{,}00944\cdot 0{,}8}} + 1{,}108\frac{1\,730}{\sqrt{4\,000}} - 4{,}58\right) = 0{,}71\ \Omega.$$

10.A.6. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom Laurentove formule (10.2–2):

$$R_z = \frac{\rho_{z2}}{2D_r} + \frac{\rho_{z1}}{L}$$

te za $\rho_{z2} = \rho_{z1}$ slijedi:

$$R_z = \frac{\rho_{z1}}{2D_r} + \frac{\rho_{z1}}{L}$$

Formula ima isti oblik kao formula (10.1–1), te je i jednak otpor uzemljenja $R_z = 0{,}76\ \Omega$.

Za različite vrijednosti otpornosti tla: $\rho_{z1} = 100\ \Omega$m, $\rho_{z2} = 50\ \Omega$m uvrštavanjem u formulu (10.2–2) dobiva se:

$$R_z = \frac{50}{2\cdot 71{,}467} + \frac{100}{1\,730} = 0{,}408\ \Omega.$$

10.A.7. Proračun otpora mrežastog uzemljivača uporabom formule (10.2–4) za točniji izračun, za jednoslojno tlo ρ_{z1} i uz ispunjenje uvjeta da je $H \ll l$

$$R_z = 1{,}6\frac{\rho_{z1}}{P} + 0{,}6\frac{\rho_{z1}}{L} = \frac{1{,}6\cdot 100}{260} + 0{,}6\cdot\frac{100}{1\,730} = 0{,}65\ \Omega.$$

Opseg mrežastog pravokutnog uzemljivača 50 · 80 m je $P = 260$ m. Za dvoslojno tlo: $\rho_{z1} = 100\ \Omega$m, $\rho_{z2} = 50\ \Omega$m i za debljinu gornjeg sloja $H = 4$ m omjer $H/l = 4/80 = 0{,}05$, te je ispunjen uvjet da je $H \ll l$, pa se otpor uzemljenja može izračunati uporabom formule (10.2–4):

$$R_z = 1{,}6\frac{\rho_{z2}}{P} + 0{,}6\frac{\rho_{z1}}{L} = \frac{1{,}6\cdot 50}{260} + 0{,}6\cdot\frac{100}{1\,730} = 0{,}34\ \Omega.$$

Iz proračuna se vidi povoljan utjecaj male otpornosti donjeg sloja tla ($\rho_{z2} = 50\ \Omega$m).

Uporabom formule (10.2–5), uz pretpostavku da je debljina gornjeg sloja $H = 10$ m, te da nije ispunjen uvjet $H \ll l$ ($10 < 80$, ali nije $10 \ll 80$) dobiva se:

$$R_z = 1{,}6\frac{\rho_{z2}}{P} + 0{,}6\frac{\rho_{z1}}{L} + \rho_{z1}\frac{H}{A} = \frac{1{,}6\cdot 50}{260} + 0{,}6\cdot\frac{100}{1\,730} + \frac{100\cdot 10}{4\,000} = 0{,}69\ \Omega.$$

Iz proračuna se vidi utjecaj posljednjeg člana $\rho_{z1}\cdot H/A$ na povećanje otpora za 0,25 Ω, te se preporučuje ispitati ili procijeniti debljinu gornjeg sloja H.

10.A.8. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom poboljšane Laurentove formule za dvoslojno tlo (10.2–6):

$$R_z = \frac{\rho_{z2}}{2D_r}\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^g + \frac{\rho_{z1}}{L}, \quad g = \frac{2H}{\sqrt{A}}$$

Za $H = 4$ m i iste podatke dobiva se:

$$g = \frac{2\cdot 4}{\sqrt{4\,000}} = 0{,}12649, \quad R_z = \frac{50}{2\cdot 71{,}467}\left(\frac{100}{50}\right)^{0{,}12649} + \frac{100}{1\,730} = 0{,}44\ \Omega.$$

Za $H = 10$ m:

$$g = \frac{2\cdot 10}{\sqrt{4\,000}} = 0{,}316, \quad R_z = \frac{50}{2\cdot 71{,}467}\left(\frac{100}{50}\right)^{0{,}316} + \frac{100}{1\,730} = 0{,}49\Omega.$$

Iz proračuna se vidi znatno povećanje otpora uzemljenja povećanjem debljine gornjeg sloja H veće otpornosti $\rho_{z1} = 100\ \Omega$m.

10.A.9. Proračun otpora mrežastog uzemljivača uporabom formule (10.2–8) za točniji proračun, a za dvoslojno tlo istih podataka:

$$R_z = \left[0{,}53\frac{\rho_{z2}}{\sqrt{A}}\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^g + \frac{\rho_{z1}}{L\sqrt[3]{m}}\right]\cdot\left[1 - 0{,}8\left(\frac{100h\cdot d}{\sqrt{A}}\right)^{0{,}25}\right]$$

Za $H = 4$ m i $m = \sqrt{M} + 1 = \sqrt{160} + 1 = 13{,}649$ uvrštavanjem dobiva se:

$$R_z = \left[0{,}53\frac{50}{\sqrt{4\,000}}\left(\frac{100}{50}\right)^{0{,}12649} + \frac{100}{1\,730\sqrt[3]{13{,}649}}\right]\cdot$$

$$\cdot\left[1 - 0{,}8\left(\frac{100\cdot 0{,}8\cdot 0{,}00944}{\sqrt{4\,000}}\right)^{0{,}25}\right] = 0{,}35\Omega$$

Iz tog proračuna uočava se utjecaj broj okana mrežastog uzemljivača (dubine ukopa h i vrlo male otpornosti donjeg sloja ρ_{z2}) na smanjenje otpora uzemljenja.

10.A.10. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom točnije formule (10.2–15) za jednoslojno tlo:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left(\ln\frac{2L}{h'} + K_1\frac{L}{\sqrt{A}} - K_2\right) =$$

$$= \frac{100}{\pi \cdot 1730}\left(\ln\frac{2 \cdot 1730}{0{,}0869} + 1{,}108\frac{1730}{\sqrt{4000}} - 4{,}58\right) = 0{,}67\Omega$$

Faktor $h' = \sqrt{d \cdot h} = \sqrt{0{,}00944 \cdot 0{,}8} = 0{,}0869$ m, ostali su podaci jednaki kao u primjeru 10.A.5.

10.A.11. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača uporabom točnije formule (10.2–16) za jednoslojno tlo:

$$R_z = \rho_z\left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}}\right)\right] =$$

$$= 100\left[\frac{1}{1730} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 4000}}\left(1 + \frac{1}{1 + 0{,}8\sqrt{\frac{20}{4000}}}\right)\right] = 0{,}75\Omega$$

Ispunjeni su uvjeti za upotrebu te formule, jer je dubina ukopa uzemljivača $h = 0{,}8$ m između 0,25 m i 2,5 m. Svi su podaci jednaki onima u prethodnim primjerima.

10.A.12. Proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača za dvoslojno tlo uporabom poboljšane Laurentove formule (10.2–14) za dvoslojno tlo:

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi L}\left\{k_p k_1\left[\frac{L}{\sqrt{A}} - \frac{2(x_A + 1)}{\sqrt{x_A}} + k_{rr}\left(\ln\frac{2L}{h'} + N - 1\right)\right]\right\}$$

Geometrijski faktor N za $x_A = l/b = 80/50 = 1{,}6$. Iz dijagrama na slici 10.2–4 očitava se $N = 0{,}88$. Faktor K_p očitava se iz dijagrama na slici 10.2–2 za koeficijent:

$$P = \frac{H - h}{\sqrt{A}} = \frac{4 - 0{,}8}{\sqrt{4000}} = 0{,}05$$

i za:

$$K = \frac{\rho_{z2} - \rho_{z1}}{\rho_{z2} + \rho_{z1}} = \frac{50 - 100}{50 + 100} = -0{,}33$$

Slijedi:

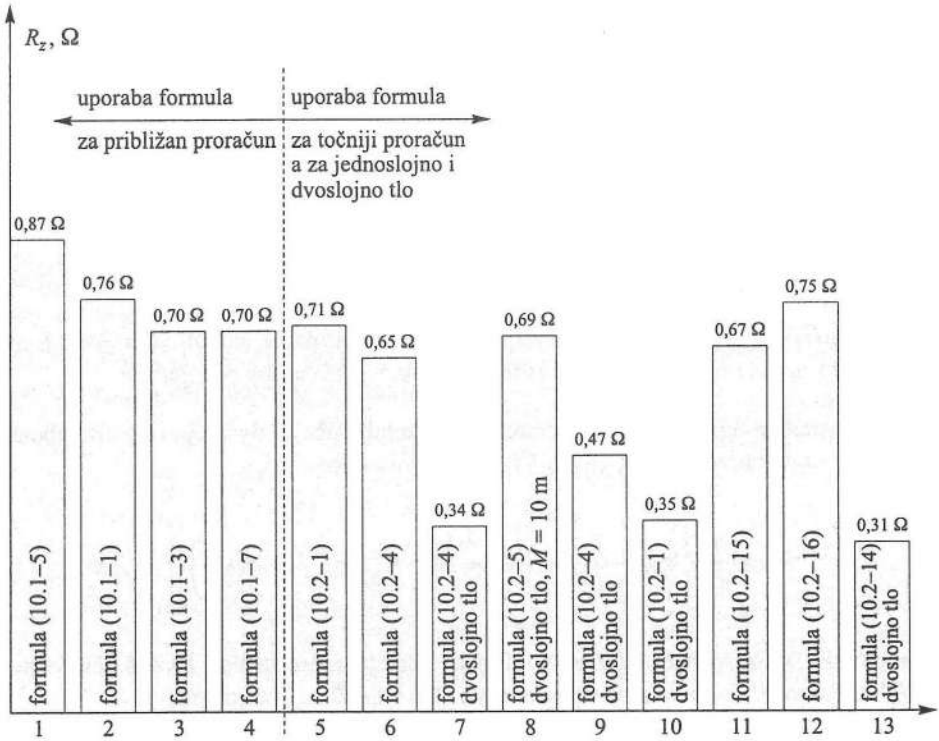
$$k_p = f(P, K) = 0{,}55$$

Faktor K_{rr} očitava se iz dijagrama na slici 10.2–3 za koeficijente $P = 0{,}05$ i $K = -0{,}33$, $K_{rr} = 0{,}53$.

Faktor K_1 nije promijenjen i iznosi $K_1 = 1{,}108$, a ostali su podaci jednaki onima u prethodnim primjerima.

Uvrštavanjem se dobiva:

$$R_z = \frac{100}{\pi \cdot 1730}\left\{0{,}55 \cdot 1{,}108\left[\frac{1730}{\sqrt{4000}} - \frac{2(1{,}6+1)}{\sqrt{1{,}6}} + 0{,}53\left(\ln\frac{2 \cdot 1730}{0{,}0869} + 0{,}88 - 1\right)\right]\right\} =$$
$$= 0{,}31\Omega.$$



Sl. 10.3–2. Izračunani otpori uzemljenja po navedenim formulama za jednoslojno i dvoslojno tlo.

Primjer 10B

Izračunajte dopušteni napon dodira i koraka mrežastog uzemljivača primjenom programskog paketa CYMGRN za sljedeće parametre:

- struja zemljospoja $I_z = 8$ kA
- otpornost tla: $\rho_{z1} = 100$ i 500 Ωm, s nasipanjem gornjeg sloja kamenom tucanikom (krupnim pijeskom) debljine 18 cm i otpornosti $\rho_{z2} = 2000$ Ωm
- dimenzije $a \times b = 80$ m · 80 m s oknima 10 m · 10 m, polumjer vodiča: $r = 10$ mm
- broj slojeva tla s nasutim slojem: dvoslojno tlo.

Otpor ljudskog tijela treba računati prema IEC normi tako da je otpor tijela premašen u 95 % slučajeva, fibrilacijsku struju treba računati prema IEEE normi 80 (*Series Expansion*) za vrijeme isklopa od 0,125, 0,25 i 0,50 s.

Tablica 10.3–1.

Vrijeme isklopa kvara, s	0,125	0,250	0,500
Koeficijent smanjenja struje	1,224	1,120	1,000
Fibrilacijska struja, A	0,351	0,313	0,128
Otpor tijela, Ω	686,13	702,23	824,16

Tablica 10.3–2.

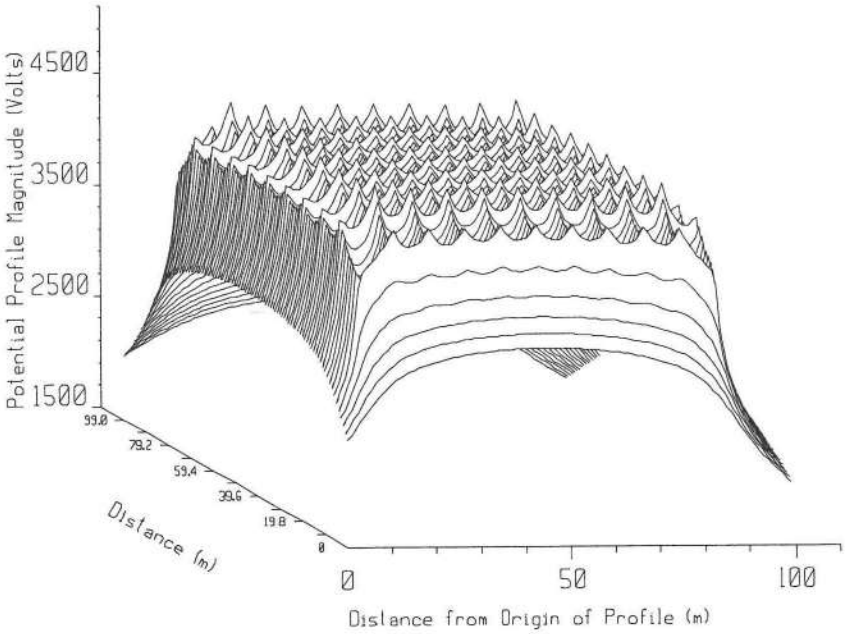
Otpornost dvoslojnog tla, Ωm	Vrijeme isklopa kvara, s						Otpor stopala, Ω
	0,125		0,250		0,500		
	Napon koraka, V	Napon dodira, V	Napon koraka, V	Napon dodira, V	Napon koraka, V	Napon dodira, V	
ρ_{z1} = 500,0	1337,4	514,9	1196,2	463,6	505,7	205,6	1562,5
ρ_{z2} = 2000,0	1946,0	667,1	1738,2	599,2	727,8	261,1	2429,7

Napomena: Izlistane vrijednosti napona dodira i koraka za trajanja asimetrične struje kratkog spoja

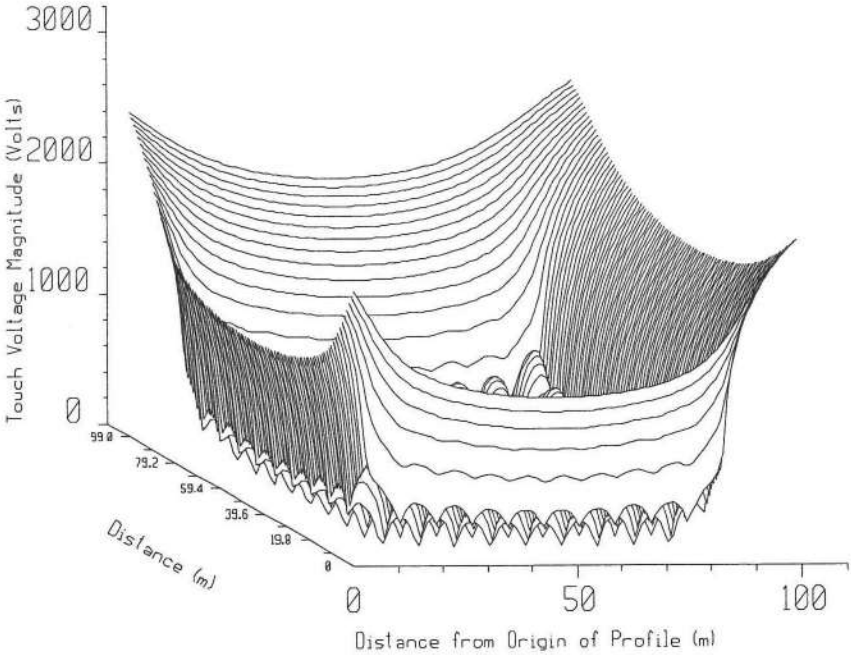
Tablica 10.3–3.

Otpornost dvoslojnog tla, Ωm	Vrijeme isklopa kvara, s						Otpor stopala, Ω
	0,125		0,250		0,500		
	Napon koraka, V	Napon dodira, V	Napon koraka, V	Napon dodira, V	Napon koraka, V	Napon dodira, V	
ρ_{z1} = 100,0	460,1	295,6	414,8	268,3	185,6	125,5	312,5
ρ_{z2} = 2000,0	955,2	419,4	855,8	378,6	366,3	170,7	1018,0

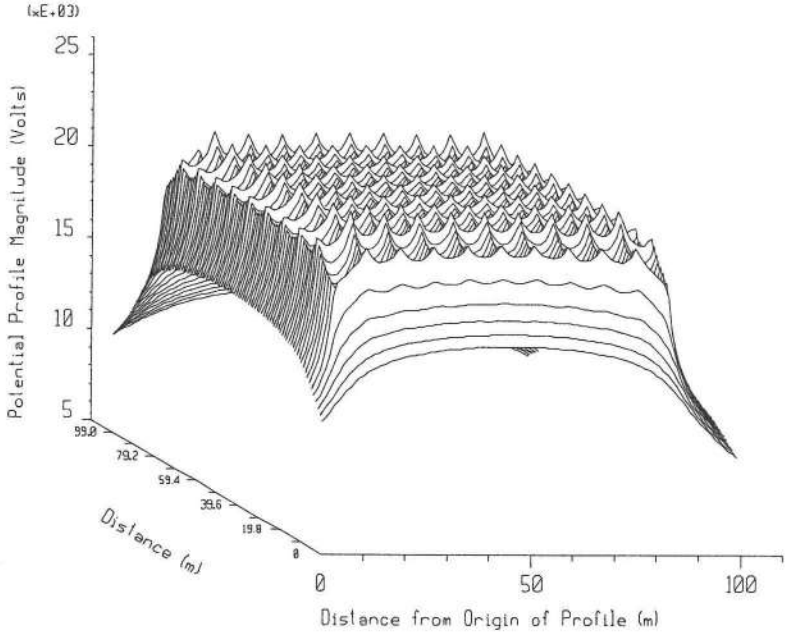
Napomena: Izlistane vrijednosti napona dodira i koraka za trajanja asimetrične struje kratkog spoja.



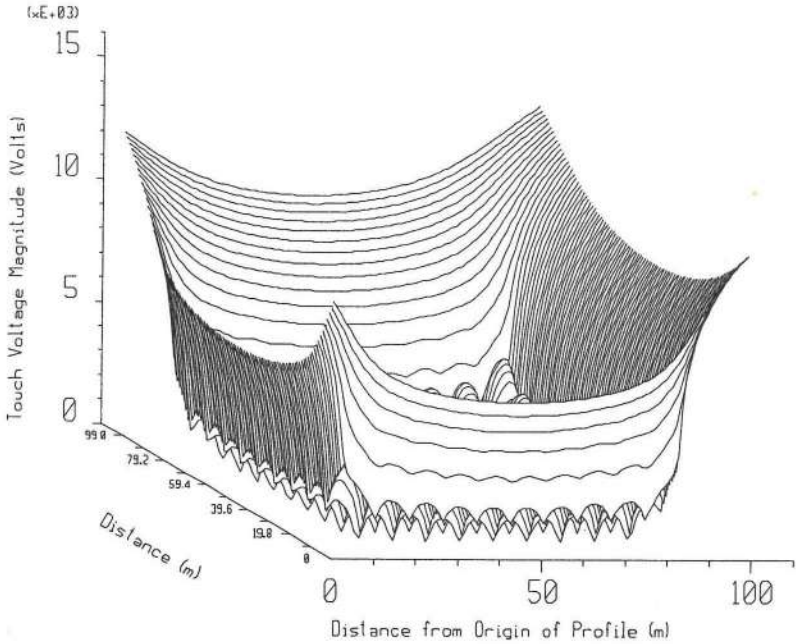
Slika 10.3–3. Raspodjela potencijala za struju kratkog spoja 8 kA i tlo otpornosti 100 Ωm.



Slika 10.3–4. Raspodjela dodirnog napona za struju kratkog spoja 8 kA i otpornosti tla od 100 Ωm.



Slika 10.3–5. Raspodjela potencijala za struju kratkog spoja 8 kA i tlo otpornosti 500 Ωm.



Slika 10.3–6. Raspodjela napona dodira za struju kratkog spoja 8 kA i otpornosti tla od 500 Ωm.

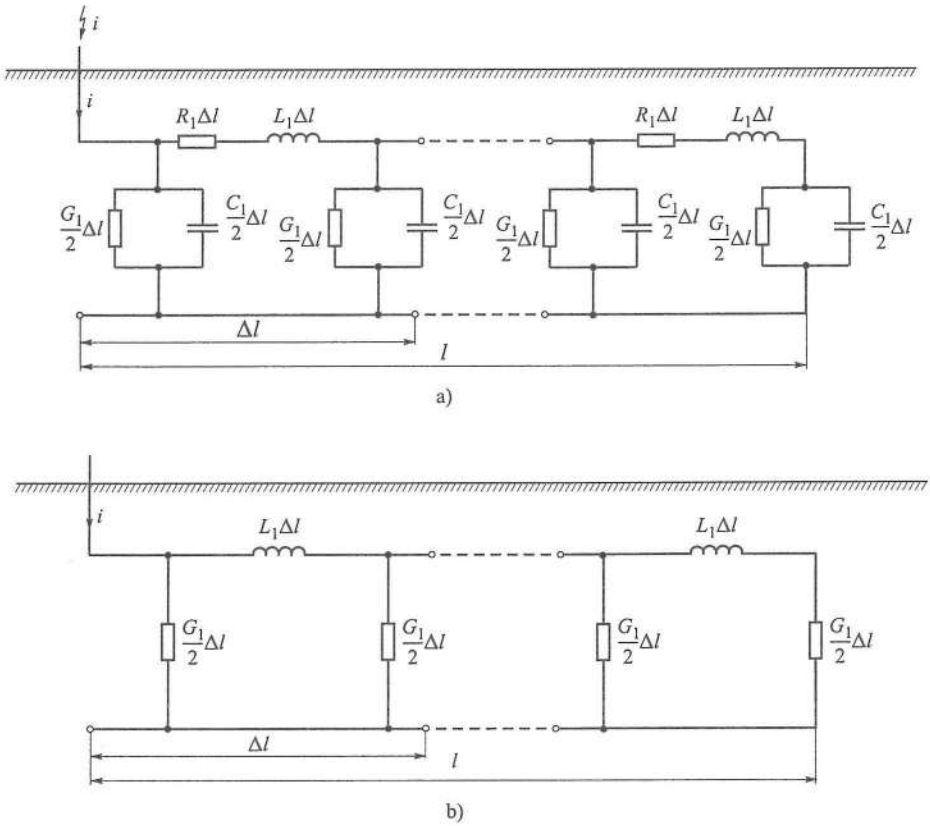
11. UZEMLJIVAČI INSTALACIJA ZA ZAŠTITU OD ATMOSFERSKIH PRAŽNJENJA (IMPULSNI UZEMLJIVAČI)

11.1. PRIBLIŽNI IZRAČUN IMPULSNOG OTPORA ŠTAPNOG I TRAKASTOG UZEMLJIVAČA

Trakasti uzemljivač u loše vodljivom zemljištu može se zamisliti kao nadzemni vod s ravnomjerno raspoređenim parametrima, odnosno kao vod kojemu je po jediničnoj duljini uzdužni otpor R_1, induktivitet L_1, kapacitet C_1 i odvod G_1. Tlo u kojem se nalazi uzemljivač ima, kao i svaki drugi medij, svoju otpornost ρ_z, dielektričku konstantu ε_r i magnetsku permeabilnost μ_r. Otpornost tla mijenja se u širokim granicama i jednako se tako mijenja dielektrična konstanta prema sastavu tla i sadržaju vode, pa ta konstanta za jako suho tlo iznosi $\varepsilon_r = 1$ (kao zrak), a za jako vlažno $\varepsilon_r = 80$ (kao voda). Što se tiče magnetske permeabilnosti μ_r, može se uzeti da je ona konstantna i da je njezina vrijednost jednaka 1.

U skladu s teorijom vodova, svakom uzemljivaču kroz koji protječe struja odgovara povratni vodič koji predstavlja utjecaj samog tla. Taj je vodič na određenoj udaljenosti paralelan s uzemljivačem. Nadomjesna shema jednoga takvog uzemljivača duljine l može se u skladu s našim pretpostavkama predočiti lancem četveropola, kao što je to prikazano na slici 11.1–1.

Iz slike se zapaža da je uzdužna grana jednog četveropola sastavljena od samo jednog dijela ukupnoga uzdužnog otpora uzemljivača, koji je na slici označen s $R_1\Delta l$, te od samo jednog dijela ukupnog induktiviteta koji je na slici označen s $L_1\Delta l$. Jednako tako, paralelne grane tog četveropola sadrže samo dio $C_1\Delta l$ ukupnog kapaciteta uzemljivača prema zemlji. Taj dio kapaciteta podijeljen je na dva jednaka dijela $(C_1/2)\Delta l$. Na kraju, što je najvažnije, paralelne grane tog četveropola sadrže i dio $G_1\Delta l$ ukupnog odvoda, pa je i taj djelić isto tako podijeljen na dva jednaka dijela $(G_1/2)\Delta l$.



Sl. 11.1–1. Lanac π četveropola impulsnog uzemljivača s parametrima L_1, G_1 i C_1.

Da bismo izračunali i sastavili nadomjesnu shemu nekoga štapnog ili trakastog uzemljivača, za približne izračune podaci jediničnih vrijednosti parametara G_1, C_1, L_1 dani su u tablici 11.1–1.

Tablica 11.1–1. Parametri štapnih i trakastih impulsnih uzemljivača.

Jedinični parametri	Štapni uzemljivač	Trakasti uzemljivač
odvod G_1, S/m	$\frac{6{,}28}{\rho_z}\cdot\frac{1}{\ln\frac{l}{r}}$	$\frac{3{,}1}{\rho_z}\cdot\frac{1}{\ln\frac{l}{r}}$
kapacitet C_1, F/m	$56\cdot10^{-1}\cdot\frac{1}{\ln\frac{l}{r}}$	$28\cdot10^{-21}\cdot(1+\varepsilon_r)\cdot\ln\frac{l}{r}$
induktivitet L_1, H/m	$0{,}20\cdot10^{-6}\cdot\ln\frac{l}{r}$	$0{,}20\cdot10^{-6}\cdot\ln\frac{l}{r}$

Izrazi u tablici omogućuju da izračunamo jedinične vrijednosti parametara za štapne i trakaste uzemljivače bilo kako velikih promjera i duljina. Međutim, u praksi su takvi uzemljivači normiranih dimenzija, pa neki od tih parametara ne utječu na raspršivanje struje munje. Tako se uzdužni otpor R tih uzemljivača praktički može zanemariti, jer ne utječe na veličinu struje munje. Jednako tako, s obzirom na oblik i površinu uzemljivača koji dolaze u praksi, može se reći da i njihov kapacitet C prema tlu ne dolazi praktički do izražaja. Zato je i taj parametar dopušteno izostaviti.

Zanemarenje tih parametara iz nadomjesne sheme na slici 11.1–1.a) zbog njihova neznatnog utjecaja, dovodi do toga da pojednostavnjena nadomjesna shema izgleda kao na slici 11.1–1.b). Prema tome, uzima se da na raspršivanje struje munje pretežno utječu induktivitet L i odvod uzemljivača G. Za štapne i trakaste uzemljivače koji dolaze u praksi opravdano je računati da se njihov induktivitet malo mijenja s promjenom vrste tla. Naprotiv, odvod se mijenja mnogo više s promjenom vodljivosti tla u kojem je ukopan, pa ga treba od slučaja do slučaja posebno računati.

11.1.1. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja

Prije nego što se priđe određivanju otpora rasprostiranja struje munje, uzimajući u obzir samo odvod i induktivitet uzemljivača prema nadomjesnoj shemi na slici 11.1–1.b), potrebno je dati neka osnovna fizikalna tumačenja, jer su pojave pri prolasku jakih struja munje i kroz tako jednostavno zamišljene uzemljivače i kroz tlo dosta složene. Opisat ćemo kako se to otprilike zbiva.

Uzemljivači pri odvođenju jakih struja munje poprimaju visoke potencijale i oko njih se stvara električno polje. To se posebno pojavljuje u loše vodljivom tlu. To električno polje katkada je jače od probojnog napona zemljišta i u okolišu uzemljivača nastupa proboj. Zemlja postaje zbog toga u njegovu okolišu vodljiva. Ta pojava, sama po sebi, dobro bi došla jer tada to stanje možemo shvatiti kao povećanje presjeka našeg uzemljivača, što bi konačno značilo smanjenje otpora uzemljenja R_z. Međutim, induktivitet uzemljivača, što fizikalno označava magnetski tok oko uzemljivača, onemogućuje jednako otjecanje struje s metalnog vodiča po njegovoj cijeloj duljini. Zato je struja prisiljena da se više raspršuje u zemlju samo po duljini prvih nekoliko metara. Tu drugu pojavu, koja ne dopušta da se aktivira cijela duljina uzemljivača, možemo sada obrnuto shvatiti kao povećanje otpora uzemljenja. O tome koja će od tih dviju suprotnih tendencija prevladati ovisi rezultirajući otpor rasprostiranja struje munje, koji nazivamo udarni ili impulsni otpor rasprostiranja (uzemljenja) R_i. Taj impulsni otpor može biti manji ili veći od otpora uzemljenja R_z koji nastaje pri rasprostiranju istosmjerne struje ili izmjenične struje niske frekvencije u tlo.

Razlika između impulsnog otpora uzemljenja R_i i otpora uzemljenja R_z za struje tehničke frekvencije ne ovisi samo o jačini struje munje nego i o obliku struje. Posebno na nju mnogo utječu strmina struja munje ($\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$) koja može poprimiti vrlo različite vrijednosti, od 0,3 do 80 kA/μs. Struja munje velikih strmina sporije prodiru u uzemljivač jer im se suprotstavlja induktivni otpor uzemljivača. Što je strmina struje veća, odnosno što je vrijeme trajanja čela vala $T_č$ kraće, struja će prodrijeti dulje po cijeloj duljini uzemljivača. To onemogućuje odvođenje struje munje po cijeloj dulji-

ni uzemljivača u isto vrijeme kad nailazi na njega naponski val, te se prema formuli (11.1–1) mijenja aktivna duljina uzemljivača l_A.

Iz svih tih upravo izloženih činjenica može se zaključiti da pri provođenju struje munje u zemlju ne sudjeluje uvijek cijeli uzemljivač, nego samo jedan njegov dio. Ta okolnost sigurno ima utjecaj na ukupni otpor koji se pojavljuje pri rasprostiranju struje u zemlji. Da bi se taj otpor izračunao, mora se prvo odrediti aktivna duljina uzemljivača. Pri računanju aktivnog dijela duljine nekog štapnog ili trakastog uzemljivača koji sudjeluje u vođenju struja groma l_A mora se uzeti u obzir jedinični odvod uzemljivača G_1, jedinični induktivitet L_1 i vrijeme trajanja čela strujnog vala $T_č$ po formuli:

$$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}} \qquad (11.1\text{–}1)$$

gdje je:

l_A aktivna duljina uzemljivača, m
G_1 jedinični odvod, S/m
L_1 jedinični induktivitet, mH/m
$T_č$ vrijeme trajanja čela vala, μs.

Taj izraz za aktivnu duljinu uzemljivača osniva se na analitičkoj vezi između odvoda G_1, induktiviteta L_1 i duljine trajanja čela struje munje $T_č$. To omogućuje da se s pomoću njega procijeni hoće li neki uzemljivač određene duljine l normalno odvoditi struju munje u zemlju ili će to činiti samo jednim dijelom svoje duljine l_A, te će na taj način zapravo povećati otpor pri raspršivanju struje. Zato bismo ukratko mogli reći: Ako je uzemljivač u zemlji dulji od izračunane aktivne duljine ($l > l_A$), tada on djeluje samo do duljine l_A. Obrnuto, ako je uzemljivač u zemlji kraći od aktivne duljine ($l < l_A$), on djeluje cijelom svojom duljinom l te nema problema pri prolasku struje munje, odnosno ne treba očekivati promjenu impulsnog otpora uzemljenja R_i.

Račun impulsnog otpora uzemljenja olakšava činjenica da je jedinični induktivitet L_1 za uzemljivače u svim vrstama tla prilično konstantan i da se njegova vrijednost mijenja u uskim granicama, od 1 do 2 mH/m. Stoga se udarni ili impulsni otpor uzemljenja R_i računa samo u ovisnosti o odvodu uzemljivača G_1 i u ovisnosti o vremenu trajanja čela vala $T_č$.

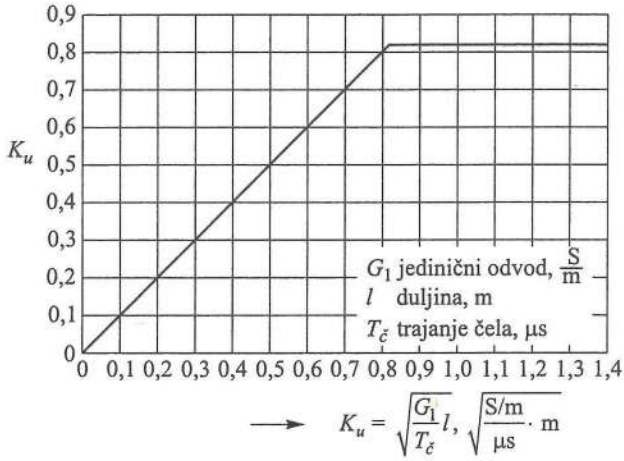
Za približni izračun impulsnog otpora uzemljenja uzemljivača R_i upotrebljava se izraz:

$$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 \cdot T_č}}, \quad \text{za } K_u < 0{,}82 \qquad (11.1\text{–}2)$$

K_u je faktor ovisan o duljini uzemljivača l, odvodu uzemljivača G i o vremenu trajanja čela struje groma $T_č$, taj faktor može se pročitati iz dijagrama na slici 11.1–2 ili izračunati iz formule:

$$K_u = l\sqrt{\frac{G_1}{T_č}} \qquad (11.1\text{–}3)$$

s time da je $K_u \leq 0{,}82$.



Slika 11.1–2. Dijagram za približno računanje impulsnog faktora K_u.

Iz dijagrama se vidi da je impulsni faktor K_u za izračunane vrijednosti veće od 0,82 ograničen na vrijednost 0,82.

Za računanje najvećeg potencijala U_{maks}, koji stvara na uzemljivaču vršna vrijednost struje munje, treba pomnožiti vršnu vrijednost struje munje I_u s izračunanim impulsnim otporom uzemljenja R_i po formuli (11.1–2), te je:

$$U_{maks} = I_u R_i \tag{11.1–4}$$

Prema [26] za duge uzemljivače, a to su trakasti i slični uzemljivači duljine veće od 20 m, tj. uzemljivači kojim vrijeme prostiranja prenaponskog vala utječe na promjenu otpora uzemljenja, preporučuje se da se vrijeme trajanja čela struje munje $T_č$ uzima od 3 do 6 μs. Ta promjena otpora uzemljenja nastaje zbog kašnjenja stvaranja iskre i luka u zemlji kao posljedica velike struje munje i stvaranja jakog električnog polja oko uzemljivača.

Prema [2] pozitivni udari munje obično se sastoje od jednog izbijanja koje traje od 0,1 do 0,2 s, s trajanjem čela od 20 do 50 μs. Trajanje čela negativnog udara [2] u prvom izbijanju iznosi od 10 do 15 μs, a već pri drugom izbijanju je kraće. Preporučuje se da trajanje čela prenaponskog vala prema [28] za izračun impulsnog otpora uzemljenja bude od 1,8 do 4,5 μs.

Primjer 11A

Treba izračunati impulsni otpor uzemljenja R_i i aktivnu duljinu impulsnog uzemljivača l_A trakastog uzemljivača za sljedeće podatke:

- otpornost tla ρ_z = 100, 1000 Ωm
- duljina trakastog uzemljivača l = 10, 20, 25, 30, 40, 50, 100 m

- trakasti uzemljivač je željezna pocinčana traka 25 mm × 4 mm; $r = \sqrt{100/\pi} = 5{,}64$ mm, a može se pretpostaviti da je jednak polovici širine trake tj. $r = d/2 = 25/4 = 6{,}25$ mm
- trajanje čela vala $T_č = 1{,}8$ μs, 4,5 μs
- dubina polaganja trakastog uzemljivača $h = 0{,}8$ m
- jedinični induktivitet $L_1 = 1{,}5$ mH/m.

Rezultati izračuna dani su u tablici 11.1–2. U tablici za promjer trakastog uzemljivača d nije uzet računski promjer $d = \sqrt{4 \cdot 100/\pi} = 11{,}28$ mm, koji je manji od preporučljivog promjera da je jednak polovici širine trake, tj. $25/2 = 12{,}5$ mm, što je namjerno učinjeno jer je nepovoljnije.

Tablica 11.1–2. Izračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za različite duljine trakastog uzemljivača l, otpornosti tla ρ_z i trajanja čela strujnog vala $T_č$.

l, m	10	20	25	30	40	50	100
ρ_z, Ωm	100	100	100	100	100	100	100
$T_č$, μs	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
$G_1 = \frac{3{,}1}{\rho_z} \cdot \frac{1}{\ln \frac{l}{r}}$, S/m	0,0042	0,00384	0,00374	0,00366	0,00354	0,00345	0,00320
$K_u = l, \mathrm{m}\sqrt{\frac{G_1, \mathrm{S}}{T_č, \mu\mathrm{s}}}$	0,483	0,924	1,1396	1,3528	1,7739	2,1889	4,216
odabrani faktor K_u^*	0,483	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820
$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 T_č}}$, Ω	23,812	14,668	14,863	15,025	15,277	15,475	16,068
$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \ln \frac{l^2}{hd}$, Ω	14,659	8,433	7,030	6,052	4,768	3,956	2,199
$\alpha_{i_{T=1,8}} = \frac{R_i}{R_z}$	1,624	1,739	2,114	2,483	3,204	3,912	7,307
$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}}$, m	18,593	19,444	19,704	19,918	20,253	20,515	21,301
$l_A^{**} = 1{,}4\sqrt{\rho_z T_č}$, m	18,783	18,783	18,783	18,783	18,783	18,783	18,783

* Najveća vrijednost faktora K_u pri izračunu impulsnog otpora uzemljenja je 0,82.

** Aktivna duljina l_A računata prema [44].

Tablica 11.1–2. – nastavak

l, m	10	20	25	30	40	50	100
ρ_z, Ωm	100	100	100	100	100	100	100
$T_č$, μs	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
$K_u = l, \mathrm{m}\sqrt{\frac{G_1, \mathrm{S}}{T_č, \mu\mathrm{s}}}$	0,306	0,584	0,721	0,856	1,122	1,3844	2,667
odabrani faktor K_u^*	0,306	0,584	0,721	0,820	0,820	0,820	0,820
$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 T_č}}$, Ω	23,777	13,026	10,691	9,503	9,662	9,787	10,163
$\alpha_{i_{T=4,5}} = \frac{R_i}{R_z}$	1,622	1,545	1,521	1,570	2,026	2,474	4,622
$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}}$, m	29,398	30,746	31,154	31,493	32,022	32,437	33,680
$l_A^{**} = 1{,}4\sqrt{\rho_z T_č}$, m	29,698	29,698	29,698	29,698	29,698	29,698	29,698
l, m	10	20	25	30	40	50	100
ρ_z, Ωm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$T_č$, μs	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
$G_1 = \frac{3{,}1}{\rho_z}\cdot\frac{1}{\ln\frac{l}{r}}$, S/m	0,000420	0,000384	0,000374	0,000366	0,000354	0,000345	0,000320
$K_u = l, \mathrm{m}\sqrt{\frac{G_1, \mathrm{S}}{T_č, \mu\mathrm{s}}}$	0,153	0,292	0,360	0,428	0,561	0,692	1,333
odabrani faktor K_u^*	0,153	0,292	0,360	0,428	0,561	0,692	0,820
$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\cdot\ln\frac{l^2}{hd}$, Ω	146,587	84,325	70,301	60,519	47,678	39,563	21,988
$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 T_č}}$, Ω	237,710	130,261	107,060	91,029	70,615	57,989	50,813
$\alpha_{i_{T=1,8}} = \frac{R_i}{R_z}$	1,622	1,545	1,523	1,504	1,481	1,466	2,311
$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}}$, m	58,797	61,492	62,308	62,986	64,044	64,874	67,361
$l_A^{**} = 1{,}4\sqrt{\rho_z T_č}$, m	58,397	61,492	62,308	62,986	64,044	64,874	67,361

* Najveća vrijednost faktora K_u pri izračunu impulsnog otpora uzemljenja je 0,82.

** Aktivna duljina l_A računata prema [44].

Tablica 11.1–2. – nastavak

l, m	10	20	25	30	40	50	100
ρ_z, Ωm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$T_č$, μs	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
$K_u = l, \mathrm{m}\sqrt{\frac{G_1, \mathrm{S}}{T_č, \mu\mathrm{s}}}$	0,0966	0,185	0,228	0,270	0,355	0,438	0,843
odabrani faktor K_u^*	0,0966	0,185	0,228	0,270	0,355	0,438	0,820
$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 T_č}}$, Ω	238,118	130,034	106,911	91,262	70,577	57,944	51,260
$\alpha_i = \frac{R_i}{R_z}$	1,624	1,542	1,521	1,508	1,480	1,465	1,422
$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}}$, m	92,967	97,283	98,518	99,589	101,263	102,575	106,507
$l_A^{**} = 1{,}4\sqrt{\rho_z T_č}$, m	93,915	93,915	93,915	93,915	93,915	93,915	93,915

* Najveća vrijednost faktora K_u pri izračunu impulsnog otpora uzemljenja je 0,82.
** Aktivna duljina l_A računata prema [44].

11.1.2. Analiza proračuna i praktični napuci

Iz izračuna u tablici 11.1–2 koji su rađeni za karakteristične parametre, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Za otpornost tla $\rho_z = 100$ Ωm i trajanje čela vala $T_č = 1{,}8$ μs (preporučuje se donja granica $T_č$ od 1,8 do 4,5 μs), aktivna je duljina uzemljivača od 18,593 m do 21,301 m za duljine trakastog uzemljivača od 10 do 100 m. Također se vidi da je kod duljine trakastog uzemljivača $l = 50$ m aktivna duljina $l_A = 20{,}515$ m, dakle oko 20 m. Drugim riječima iskorištenje je trakastog uzemljivača duljine 100 m oko 20 m, točnije $l_A = 21{,}301$ m.
- Također se vidi da je faktor:

$$K_u = l\sqrt{\frac{G_1}{T_č}},$$

  već od duljine trakastog uzemljivača $l = 20$ m ograničen na 0,82 (izračunati faktor $K_u = 0{,}924$).
- Impulsni otpor uzemljenja R_i, pri duljini trakastog uzemljivača 20 m ima vrijednost 14,668 Ω, neznatno se povećava do vrijednosti 16,068 Ω pri duljini $l = 100$ m. To je suprotno promjeni otpora uzemljenja za struju tehničke frekvencije koji se s duljinom trakastog uzemljenja smanjuje, te je za $l = 20$ m, $R_z = 8{,}433$ Ω, a za $l = 100$ m, $R_z = 2{,}199$ Ω.

- Impulsni koeficijent α_i povećava se s povećanjem duljine uzemljivača, od 1,624 za $l = 10$ m do 7,305 za $l = 100$ m.
- Za dulje trajanje čela vala, tj. za $T_č = 4{,}5$ μs (tablica 11.1–2 nastavak) pri jednakoj otpornosti tla $\rho_z = 100$ Ωm i za jednake duljine $l = 10, 20, 25, 30, 40, 50$ i 100 m povećava se aktivna duljina l_A na oko 30 m, točnije od 29,398 m za $l = 100$ m do 33,680 m.
- Osjetno se smanjuje impulsni otpor R_i za duljine trakastog uzemljivača $l > l_A$. Tako je za $T_č = 4{,}5$ za $l = 30$ m, $R_i = 9{,}503$ Ω, a za $T_č = 1{,}8$ i $l = 30$ m, $R_i = 15{,}025$ Ω, da bi se ta razlika zadržala za sve duljine $l > l_A$, tj. za duljine gdje je faktor $K_u < 0{,}82$.
- Za veći specifični otpor tla npr. $\rho_z = 1\,000$ Ωm i za $T_č = 1{,}8$ μs znatno se povećava aktivna duljina l_A na oko 62 m, točnije od 58,397 m za $l = 10$ m na 67,361 m za $l = 100$ m.
- Povećanje otpornosti tla ρ_z od 100 Ωm na 1000 Ωm znatno smanjuje faktor K_u, koji je za sve duljine, zaključno s 50 m, $K_u < 0{,}82$, a pri duljini $l = 100$ m, $K_u = 0{,}843$.
- Impulsni koeficijent α_i mijenja se blaže i to u intervalu $\alpha_i = 1{,}622$ za $l = 10$ m do 2,311 za $l = 100$ m, pa i taj podatak potvrđuje da je pri većoj otpornosti tla bolje iskorištenje impulsnih uzemljivača.
- Za ekstremno veliku duljinu trajanja čela vala $T_č = 4{,}5$ μs i $\rho_z = 1\,000$ Ωm, znatno se povećava aktivna duljina l_A na oko 100 m, točnije od 92,967 m za $l = 10$ m do 106,507 m za $l = 100$ m te se ne preporučuje izračun aktivne duljine za veliku otpornost tla i trajanje čela vala (recimo $\rho_z = 1000$ Ωm i $T_č = 4{,}5$ μs).
- Za manje duljine (10, 20, 25 m), manja je razlika između izračunane aktivne duljine trakastog izmjenjivača po formuli (11.3–6) i po formuli (11.1–1).
- Također vidimo veću razliku izračunane aktivne duljine po formuli (11.1–1) u odnosu po formuli (11.3–6) pri manjoj otpornosti tla ρ_z (recimo $\rho_z = 100$ Ωm) u odnosu na veću otpornost tla (recimo $\rho_z = 1000$ Ωm). Također je ta razlika veća pri većim duljinama trakastog uzemljivača prema duljinama trakastog uzemljivača pri manjoj otpornosti tla (recimo $\rho_z = 100$ Ωm pri duljini $l = 10$ m ta je razlika 18,783 – 18,593 = 0,19 m te pri $l = 100$ m ta je razlika: 21,301 – – 18,783 = 2,518 m). Impulsni faktor α_i smanjuje se s povećanjem duljine trakastog uzemljivača sve do duljine pri kojoj je izračunani faktor K_u jednak limitiranoj vrijednosti 0,82, a zatim se s povećanjem duljine povećavaju sve vrijednosti čela vala i otpornosti tla.
- Impulsni otpor uzemljenja izračunava se po formuli (11.1–2):

$$R_i = \frac{1}{K_u \sqrt{G_1 T_č}}$$

ako je duljina uzemljivača manja od aktivne duljine $l < l_A$ (tj. u linearnom dijelu karakteristike):

$$K_u = f\left(l\sqrt{\frac{G_1}{T_č}}\right)$$

prema slici 11.1–2 za parametre ρ_z, $T_č$ i l pogrešne rezultate, tako da je $\alpha_i > 1$.

Autor preporučuje da se za duljine uzemljivača $l < l_A$, odnosno $K_u = 0{,}82$, uzme $\alpha_i = 1$, te da se ne računa otpor R_i već samo otpor uzemljenja R_z.

- Za linearnu promjenu faktora K_u impulsni otpor ne ovisi o duljini trajanja čela vala, već samo o duljini uzemljivača l i jediničnog odvoda G_1, tj. impulsni otpor se ponaša kao otpor uzemljenja, te formula (11.1–2) prelazi u oblik:

$$R_i = \frac{1}{K_u\sqrt{G_1 T_č}}, \quad K_u = l\sqrt{\frac{G_1}{T_č}},$$
$$R_i = \frac{1}{l\sqrt{\frac{G_i}{T_č}} \cdot \sqrt{G_i \cdot T_č}} = \frac{1}{lG_i} \tag{11.1–5}$$

- Ta tvrdnja ima uporište i u tehničkim propisima [6] iz kojih navodimo tablicu 11.1–3. Prema tehničkim propisima o gromobranima [6], za štapne uzemljivače i grupe takvih uzemljivača kod kojih međusobni razmak uzemljivača nije veći od 5 m uzima se impulsni koeficijent uzemljenja $\alpha_i = 1$, što znači da je $R_z = R_i$.

Tablica 11.1–3. $\alpha_i = f(l)$ za različite otpornosti tla.

Duljina trakastog uzemljivača l, m / Impulsni koeficijent α_i	Otpornost zemlje ρ_z, Ωm				
	50	100	150	200	250 i više
do 20	2,0	1,0	*	*	*
preko 20 do 30	3,0	1,5	1,0	*	*
preko 30 do 40	4,0	2,0	1,3	1,0	*
preko 40 do 50	5,0	2,5	1,7	1,3	1,0

* Nedovoljna duljina uzemljivača.

11.2. DINAMIČKO MODELIRANJE IMPULSNIH UZEMLJIVAČA

11.2.1. Promjena otpornosti tla ρ_z u ovisnosti o gustoći struje oko uzemljivača [44]

S porastom struje i njezinim prodiranjem u zemlju u područjima koja imaju gustoću struje veću od kritične vrijednosti J_c dolazi do smanjenja otpornosti tla ρ_{z0}. Izraz za vremensku promjenu otpornosti (od trenutka pojave J_c) ima oblik:

$$\rho_z = \rho_{z0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} \tag{11.2–1}$$

gdje je:

ρ_{z0} otpornost tla pri gustoći struje koja je manja od kritične
τ_i ionizacijska vremenska konstanta ovisna o vrsti tla, s
t vrijeme mjereno od trenutka početka ionizacije tla, s.

Kada struja počne padati, vrijednost otpornosti počinje se, također po eks-ponencijalnom zakonu vraćati na početnu vrijednost ρ_{z0}. Taj proces opisuje izraz:

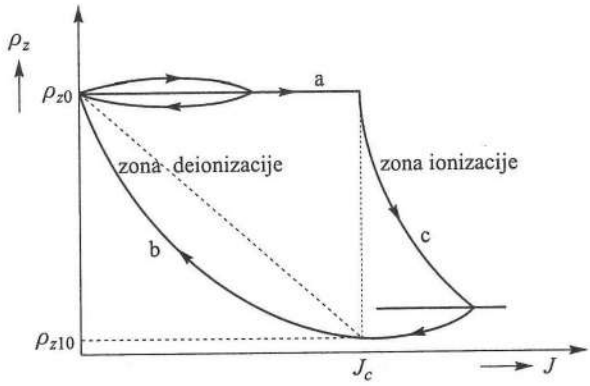
$$1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \tag{11.2–2}$$

Taj izraz pokazuje slika 11.2–1. Ovaj faktor treba pomnožiti sa

$$\left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^B \tag{11.2–3}$$

gdje je:

τ_2 deionizacijska vremenska konstanta, s
J gustoća struje kroz tlo, A/m^2
J_c kritična gustoća struje kroz tlo, A/m^2
B koeficijent ovisan o obliku strujnog vala i može se za približne izračune uzeti da je $B = 2$.



Sl. 11.2– 1. Promjena otpornosti tla ρ_z u ovisnosti o gustoći struje oko uzemljivača s karakterističnim područjima a, b i c.

Dulje vrijeme trajanja hrpta strujnog vala (veća injektirana energija) znači da je vrijednost otpornosti dulje vrijeme manja. Usvojena približna vrijednost za B iznosi 2.

Otpor ostaje konstantan i jednak ρ_{z0} sve dok gustoća struje elementa ne prijeđe kritičnu vrijednost, tj.:

$$\rho_z = \rho_{z0} \quad \text{za } J < J_c \tag{11.2–4}$$

Kada gustoća struje prijeđe kritičnu vrijednost, otpor pada po eksponencijalnom zakonu, što odgovara ionizaciji zemlje:

$$\rho_z = \rho_{z0} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad \text{za } J > J_c \tag{11.2–5}$$

Ionizacija traje sve dok se ne dostigne ekvivalentni polumjer r_{cm} koji odgovara kritičnoj vrijednosti gustoće struje.

Kompletan interval rasta struje munje do najviše vrijednosti i njezin pad do nule može se podijeliti na tri jasna segmenta. Da bismo izveli izraz za trenutačnu vrijednost impulsnog otpora, svaki segment se razmatra na sljedeći način (v. sl. 11.2–1).

- Područje a (v. sl. 11.2–1), gdje je $r > r_{\text{cm}}$ i $J < J_c$, pa je u tom intervalu otpornost tla konstantna $\rho_z = \rho_{z0}$.
- Područje b (v. sl. 11.2–1), gdje je $r < r_{\text{cm}}$ i $J < J_c$. Gustoća je struje ispod kritične vrijednosti i specifični otpor tla se vraća prema početnoj vrijednosti po sljedećem zakonu:

$$\rho_z = \rho_{z10} + (\rho_{z0} - \rho_{z10})\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right)\left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \tag{11.2–6}$$

gdje je:

τ_2 deionizacijska vremenska konstanta, s

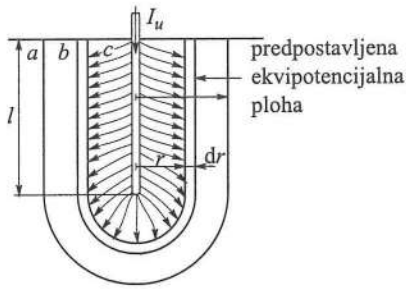
ρ_{z10} otpornost tla kada je gustoća struje jednaka kritičnoj gustoći struje tla $J = J_c$.

- Područje c gdje je $r < r_{\text{cm}}$ i $J > J_c$. Gustoća struje prešla je kritičnu vrijednost i raste po eksponencijalnom zakonu.

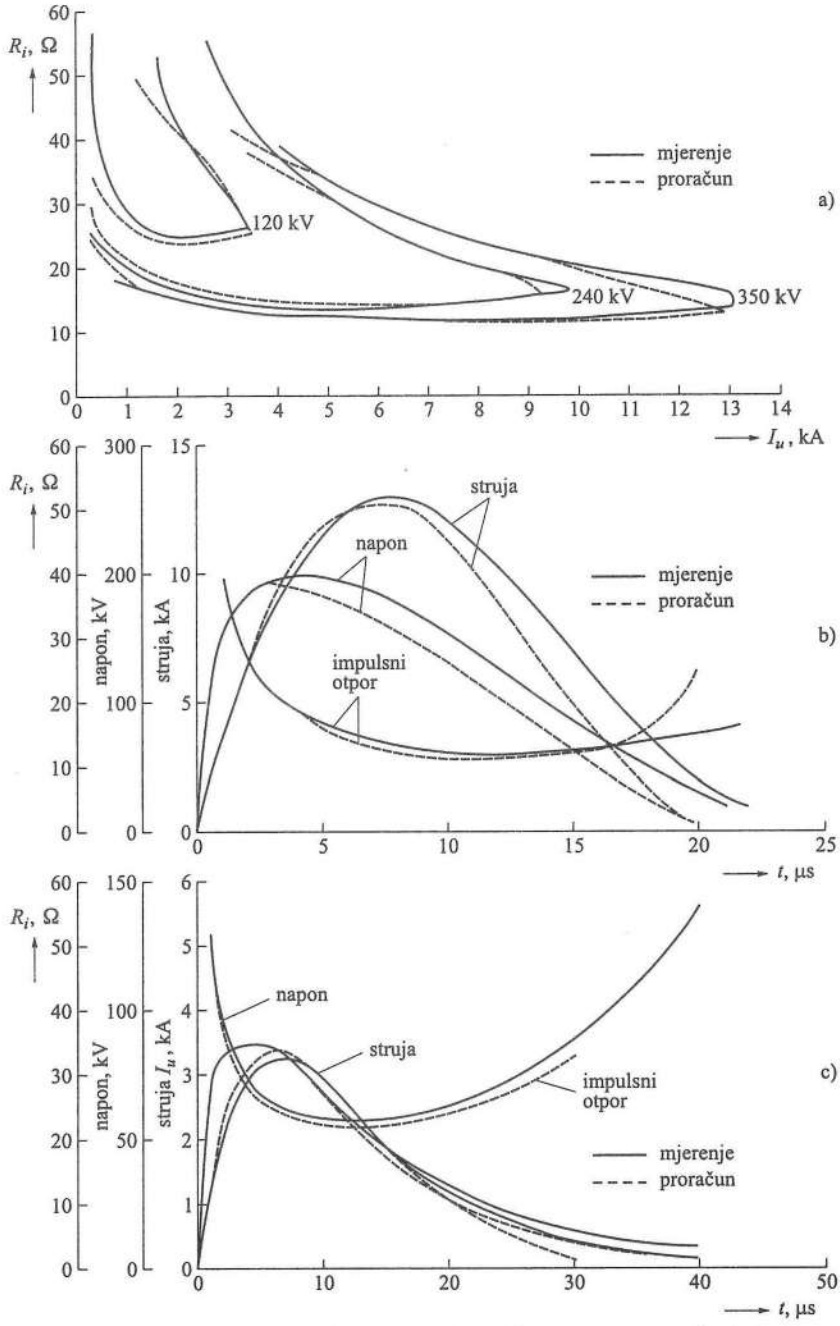
Ukupni otpor uzemljenja dobiva se zbrajanjem pojedinih otpora segmenata, kojima odgovara različita gustoća struje i ρ_z.

11.2.2. Impulsni otpor R_i štapnog uzemljivača

Kod proračuna otpora uzemljenja struje tehničke frekvencije, kao i kod proračuna impulsnog otpora uzemljenja uspravno ukopanoga štapnog uzemljivača (sonde), pretpostavlja se oblik ekvipotencijalnih ploha u okolini uzemljivača, prema slici 11.2–2. Time se pojednostavnjuje proračun. Uvođenje takve pretpostavke ne dovodi do bitne razlike u proračunu otpora uzemljenja i impulsnog otpora uzemljenja.

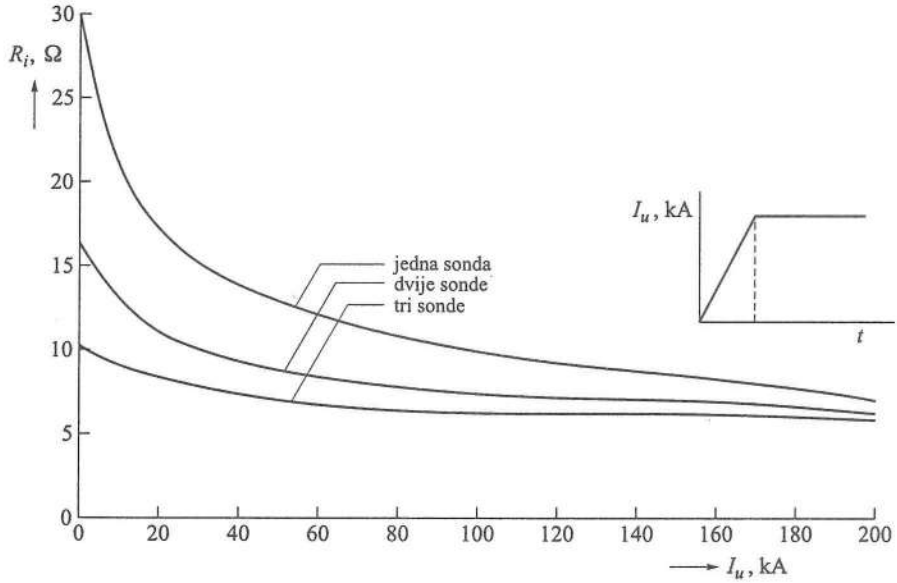


Sl. 11.2–2. Skica štapnog uzemljivača za pojednostavljenu metodu proračuna otpora uzemljenja štapnog uzemljivača.



Sl. 11.2–3. Usporedba mjerenog i izračunanog impulsnog otpora uzemljenja R_i štapnog uzemljivača za različite struje munje I_u trajanja prenaponskog vala struje munje t, pri navedenim naponima na uzemljivaču a), naponima na uzemljivaču 300 kV b) i naponima na uzemljivaču 120 kV c).

Na slici 11.2–3 navedeni su mjereni (puna crta) i proračunati rezultati (crtkana crta) impulsnog otpora uzemljenja štapnog uzemljivača. Vidi se dobro slaganje rezultata izračuna i mjerenja. Na slici 11.2–3.a) vidi se $R_i = f(I_u)$ pri različitim naponima štapnog uzemljivača. Na slici 11.2–3.b) vidi se promjena impulsnog otpora štapnog uzemljivača u ovisnosti o vremenu trajanja prenaponskog vala $R_i = f(t)$ pri impulsnom naponu od 300 kV. Na slici 11.2–3.c) vidi se $R_i = f(t)$ pri naponu od 120 kV.



Sl. 11.2–4. Ovisnost impulsnog otpora uzemljenja R_i o udarnoj struji munje.

Na slici 11.2–4 prikazani su rezultati te analize [44]. Dijagrami pokazuju znatno opadanje impulsnog otpora uzemljenja za struje munje veće od 15 kA (u prethodnim analizama uzeto je da je za struje munje veće od 15 kA impulsni otpor konstantan). Također se vidi da je promjena impulsnog otpora R_i za jednu sondu veća nego za više sonda; i da on naglo pada do vrijednosti od 100 kA, s time što znatno ovisi o svojstvima zemlje i kritičnoj jačini polja. Jedna sonda ima veći impulsni faktor α_i jer je gustoća struje u tom slučaju veća pa je proces ionizacije produžen.

Pri tom eksperimentu prema [44] korišteni su sljedeći podaci: $\rho_z = 100$ Ωm, kritična vrijednost električnog polja $q_c = 3$ kV/cm, $\tau_1 = 2$ μs, $\tau_2 = 4{,}5$ μs, duljina sonde $l = 3{,}05$ m, udaljenost između sondi 3,05 m, te polumjer sonde $r = 0{,}01$ m.

11.3. PRORAČUN IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA R_i

Radne značajke uzemljivača u uvjetima atmosferskih pražnjenja moraju biti točno poznate za analizu elektromagnetskih prijelaznih procesa. Prvi radovi iz proble-

matike proračuna otpora uzemljivača pri industrijskoj frekvenciji i u uvjetima atmosferskih pražnjenja potiču od Rudenberga [L14], Bewlyja [L12], Sundea [L26] i drugih. Bewly je prvi dao izraz za otpor uzemljenja DV stupa, dok je Bellaschi [L13] analitički izračunao napon na početku uzemljivača za impulsnu struju munje i realne parametre štapnog izmjenjivača. Napon je dan kao konvergentan red. Verma i Mukhedkar [L15] postavili su izraze za impulsnu impedanciju uzemljivačke sonde za kratke impulse. Oni su potvrdili slaganje s eksperimentom Bewlyja, koristeći se modelom raspodijeljenih parametara otpora i reaktancije. Ti su modeli bili primjenjivani jedino za jednostavnije uzemljivačke sustave, uspravno ukopane sonde i protutežne uzemljivače.

11.3.1. Parametri uzemljenog vodiča po Rudenbergu [L14]

a) Induktivnost vodiča uzemljivača, H

$$L' = 2l \cdot \ln\left(\frac{2l}{r}\right) \cdot 10^{-7}, \quad \text{H} \tag{11.3–1}$$

b) Induktivna vremenska konstanta uzemljivača T_L:

$$T_L = \frac{L'}{R'} = 4\pi \frac{l^2}{\rho_z} \cdot 10^{-7}, \quad \text{s} \tag{11.3–2}$$

c) Kapacitivna vremenska konstanta uzemljivača T_C:

$$T_C = \frac{\rho_z \varepsilon}{4\pi} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^9}, \quad \text{s} \tag{11.3–3}$$

gdje je:

- l duljina uzemljivača, m
- ε dielektrična konstanta, F/m
- r polumjer vodiča uzemljivača, m
- R' djelatni otpor vodiča uzemljivača, Ω.

11.3.2. Impulsna impedancija za štapni uzemljivač po Gupti [L11]

a) Duljina je uzemljivača veća od aktivne duljine uzemljivača, $l \geq l_A$.

Impulsna impedancija iznosi:

$$Z_i = \alpha_i \cdot R_z \tag{11.3–4}$$

gdje je:

$$\alpha_i = 0{,}333 \cdot \left(\frac{l}{l_A}\right)^{2,3} \tag{11.3–5}$$

$$l_A = 1{,}4\sqrt{\rho_z T_č} \tag{11.3–6}$$

ili prema [26] odnosno po formuli (11.1–1):

$$l_A = 1{,}1\sqrt{\frac{T_č}{G_1 L_1}}$$

gdje je:

l_A aktivna duljina uzemljivača za impulsnu struju munje, m
$T_č$ vrijeme trajanja čela vala, μs
G_1 jedinični odvod (vodljivost), S/m,
L_1 jedinični induktivitet, mH/m
l duljina trakastog uzemljivača, m.

b) Duljina uzemljivača manja je od aktivne duljine uzemljivača, $l < l_A$.

Impulsna impedancija Z_i jednaka je otporu uzemljenja na industrijskoj frekvenciji, te je:

$$Z_i = R_z \qquad \alpha_i = 1 \tag{11.3–7}$$

11.4. ANALITIČKO MODELIRANJE TRANZIJENTNIH KARAKTERISTIKA UZEMLJIVAČA I PRAKTIČNI PRORAČUN IMPULSNE IMPEDANCIJE UZEMLJENJA Z_i [45]

Osnovna je veličina koja karakterizira uzemljivač za odvod struje munje u zemlju impulsni otpor uzemljenja R_i (za manje složene uzemljivače i praktične izračune) i impulsna impedancija uzemljenja Z_i (za složenije uzemljivače i veoma točne izračune). I ovdje omjer impulsne impedancije uzemljenja Z_i i otpora uzemljenja R_z definira impulsni koeficijent α_i:

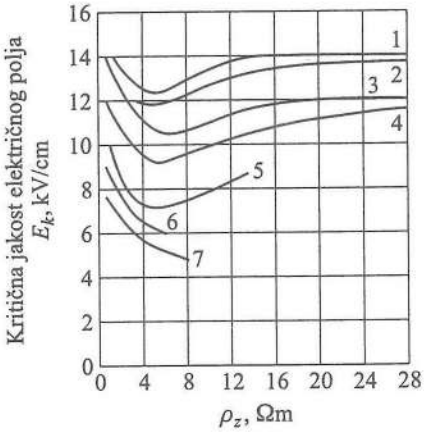
$$\alpha_i = \frac{Z_i}{R_z} \tag{11.4–1}$$

Pri proračunu impulsne impedancije uzemljenja treba uzeti u obzir duljinu uzemljivača L i kapacitet uzemljivača C koji ne utječe na proračun otpora uzemljenja R_z, tj. otpor uzemljivača pri tehničkim frekvencijama.

Utjecaj induktivnosti očituje se u početnom sprečavanju širenja struje munje do udaljenih dijelova uzemljivača, tako da s vremenom taj utjecaj slabi i vrijednost impulsne impedancije teži otporu uzemljenja. Utjecaj kapaciteta uzemljivača očituje se u smanjenju impulsne impedancije Z_i. Impulsna impedancija dolazi do izražaja kod većega otpornosti tla ρ_z.

Kod odvođenja velikih struja munje u zemlju dolazi do procesa ionizacije tla, tj. do povećanja vodljivosti oko uzemljivača, čime se smanjuje impulsna impedancija uzemljivača Z_i. Proces ionizacije tla nastaje ako je jakost električnog polja E veća od

kritične vrijednosti E_k, kako je to detaljnije dano u točki 11.2.1. i prikazano na slici 11.4–1. Također impulsna impedancija uzemljivača Z_i ovisi o trajanju čela strujnog vala $T_č$.



Sl. 11.4–1. Kritična jakost električnog polja E_k u ovisnosti o otpornosti tla ρ_z za trajanje čela vala $T_č$ i za navedene vrste tla prema tablici 11.4–1.

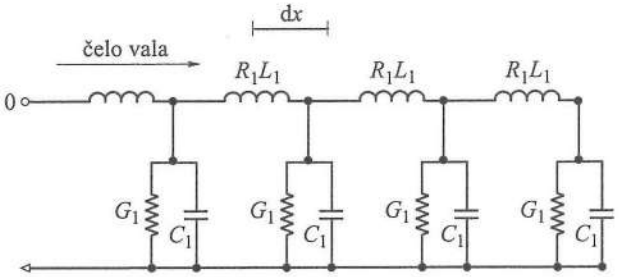
Tablica 11.4–1. Vrste tla i trajanje čela vala $T_č$ i broj krivulja za dijagram na slici 11.4–1.

Broj krivulje	Vrsta tla	$T_č$, μs
1	pijesak	3
2	pijesak	5
3	žuta glina	3
4	žuta glina	5
5	biljni humus	3
6	crvena glina	3
7	crvena glina	5

11.4.1. Proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i

Promotrimo trakasti uzemljivač ukopan u tlo konstantne otpornosti ρ_z, te konstantne permeabilnosti i dielektričnosti, s jediničnim parametrima kako je to prikazano na slici 11.4–2. Na toj slici upotrijebljene su sljedeće oznake:

l_1 jedinična duljina izmjenjivača, m
R_1 jedinični otpor uzemljivača, Ω/m
G_1 jedinična vodljivost uzemljivača prema zemlji, S/m
L_1 jedinični induktivitet uzemljivača, H/m
C_1 jedinični kapacitet uzemljivača, F/m.



Sl. 11.4–2. Trakasti impulsni uzemljivač ukopan u tlo konstantne otpornosti ρ_z, konstantne permeabilnosti i dielektričnosti s jediničnim parametrima R_1, L_1, G_1, C_1.

Prema [L2] jedinični otpor uzemljenja za trakasti uzemljivač izračunamo po formuli:

$$R_1 = \frac{\rho}{r^2\pi} \tag{11.4–2}$$

i ostale parametre po formulama:

$$G_1 = \frac{\pi}{\rho_z\left(\ln\frac{2l}{\sqrt{2hr}} - 1\right)} \tag{11.4–3}$$

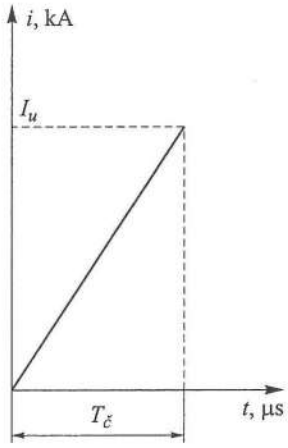
$$L_1 = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{\sqrt{2hr} - 1}\right) \tag{11.4–4}$$

$$C_1 = \frac{\pi\varepsilon_o\left(1 + \varepsilon_r\right)}{\left(\ln\frac{2l}{\sqrt{2hr}} - 1\right)} \tag{11.4–5}$$

gdje je:

ρ otpornost vodiča uzemljivača (od željeza i bakra), Ωm
r polumjer ukopanog vodiča, m
h dubina ukopa, m
μ_o permeabilnost tla, $\mu_o = 0{,}4 \cdot \pi \cdot \mu$, H/m
ε_o dielektrična konstanta, $8{,}85 \times 10^{-12}$, F/m
ε_r relativna dielektričnost tla
ρ_z otpornost tla, Ωm
l duljina uzemljivača, m
$S = \frac{I_u}{T_č}$ strmina linearno rastuće struje (kA/μs), slika 11.4–3.

Širenje prenaponskog vala duž uzemljivača opisuju parcijalne diferencijalne jednadžbe:



Sl. 11.4–3. Strmina struje vala atmosferskog prenapona.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} + R_1 i = 0 \tag{11.4–6}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} + G_1 u = 0 \tag{11.4–7}$$

Kako se vidi iz jednadžbi (11.4–6) i (11.4–7) struja i napon funkcije su prostora i vremena. Pri rješavanju gornjih jednadžbi pretpostavlja se da su parametri uzemljivača (R_1, L_1, C_1 i G_1) konstantni. Kod velikih struja munje to nije točno, jer se zbog procesa ionizacije tla povećava polumjer vodiča uzemljivača r.

Sustav jednadžbi (11.4–6) i (11.4–7) može se riješiti primjenom dvostruke Laplaceove transformacije, tako da se struja groma modelira s pomoću linearno rastuće struje, strmine:

$$S = \frac{I_u}{T_č} \tag{11.4–8}$$

Dobiva se sljedeći izraz za struju i napon:

$$i(x,t) = S\left\{\frac{l-x}{l}t - \right.$$

$$\left. -\frac{4\pi\delta}{\tau^2}\sum_{k=1}^{\infty} k \frac{\sin k\pi\frac{x}{l}}{\left(\delta^2+\omega_k^2\right)^2}\left[1-e^{-\delta t}\left(\cos\omega_k t + \frac{\delta^2-\omega_k^2}{2\delta\omega_k}\sin\omega_k t\right)\right]\right\}$$

(11.4–9)

$$u(x,t) = S\left\{\frac{1}{G_1 l}t - \frac{C_1}{G_1^2 l}\left(1 - e^{-2\delta t}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2L_1 v^2}{l} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos k\pi \frac{x}{l}}{\delta^2 + \omega_k^2}\left[1 - e^{-\delta t}\left(\cos\omega_k t + \frac{\delta}{\omega_k}\sin\omega_k t\right)\right]\right\} \tag{11.4–10}$$

Jednadžbe (11.4–9) i (11.4–10) izračunane su uz zanemarenje jediničnoga radnog otpora vodiča uzemljivača R_1 što je neznatna pogreška, te se parametri iz (11.4–9) i (11.4–10) računaju i imaju značenje:

$$\omega_k = \sqrt{\left(\frac{k\pi}{\tau}\right)^2 - \delta^2}, \quad \tau = \frac{l}{v} \tag{11.4–11}$$

gdje je:

ω_k kružna frekvencija članova Fourierova reda

τ vrijeme putovanja vala po vodu uzemljivača duljine l, μs

v brzina širenja vala, m/μs.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\delta = \frac{G_1}{2C_1} \quad \text{i} \quad \delta = -\frac{G_1}{2C_1} \tag{11.4–12}$$

$$R_z = \frac{1}{G_1 l}$$

Impulsna impedancija uzemljivača omjer je napona uzemljivača na mjestu ulaska struje munje u uzemljivač i struje munje:

$$Z_i(0,t) = \frac{u(0,t)}{i(0,t)} \tag{11.4–13}$$

te se za slučaj linearno rastuće struje munje dobiva:

$$Z_i(0,t) = \frac{1}{G_1 l} - \frac{C_1}{G_1^2 l t}\left(1 - e^{-2\delta t}\right) +$$

$$+ \frac{2L_1 \cdot v^2}{l \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\delta^2 + \omega_k^2}\left[1 - e^{-\delta t}\left(\cos\omega_k t + \frac{\delta}{\omega_k}\sin\omega_k t\right)\right] \tag{11.4–14}$$

$1/(G_1 l)$ predstavlja otpor uzemljenja pri frekvenciji 50 Hz te je $R_z = 1/(G_1 l)$ i formula (11.4–13) prelazi u oblik:

$$Z_i(0,t) = R_z - \frac{C_1}{G_1^2 lt}\left(1 - e^{-2\delta t}\right) + \\ + \frac{2L \cdot v^2}{l \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\delta^2 + \omega_k^2}\left[1 - e^{-\delta t}\left(\cos\omega_k t + \frac{\delta}{\omega_k}\sin\omega_k t\right)\right] \tag{11.4–15}$$

Posebnu pozornost treba obratiti na izračun zbroja beskonačnih konvergentnih redova. Pri nižoj otpornosti tla prvih je nekoliko članova redova imaginarno jer je:

$$\frac{k\pi}{\tau} < \delta$$

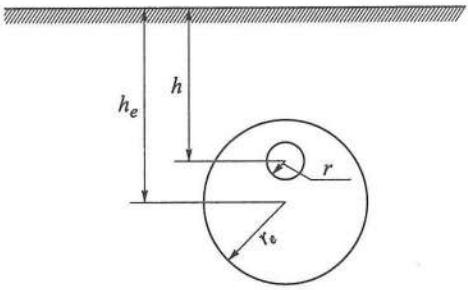
Zato je ω_k imaginarni broj pa funkcije $\sin(\omega_k t)$ i $\cos(\omega_k t)$ prelaze u hiperbolične funkcije.

11.4.2. Utjecaj ionizacije tla oko uzemljivača na impulsnu impedanciju uzemljivača Z_i

Prema [L1], a na osnovi eksperimentalnih podataka, tablica 11.4–1 daje ovisnost kritične jakosti polja E_k o otpornosti tla ρ_z za različite vrste tla i za vrijeme trajanja čela vala $T_č$ prema dijagramu na slici 11.4–1.

Utjecaj ionizacije tla oko uzemljivača može se iskazati kao povećanje polumjera uzemljivača r na ekvivalentnu vrijednost r_e, kako je to prikazano na slici 11.4–4 za dubinu ukopa h i ekvivalentnu dubinu ukopa h_e.

Pri određivanju ekvivalentnog polumjera r_e polazi se od pretpostavke da je struja odvođenja u zemlju duž uzemljivača približno jednaka vrijednosti I_z. Pri tome je I_z struja munje koja se odvodi na uzemljivač. U pravilu ima najmanje dva mjesta spajanja uzemljivača s gromobranskim dovodima (spustovima) na uzemljivač.



Sl. 11.4–4. Uzemljivač položen u dubinu h, ekvivalentnog polumjera r_e i dubine ukopa h_e pri utjecaju ionizacije tla oko uzemljivača.

Površinska gustoća struje iznosi:

$$J = \frac{I_z}{A_e} = \frac{I_z}{2\pi r_e l} \tag{11.4–16}$$

Jakost električnog polja iznosi:

$$E = \rho_z \cdot J \tag{11.4–17}$$

Slijedi ekvivalentni polumjer:

$$r_e = \frac{I_z \cdot \rho_z}{2\pi l E_k} \tag{11.4–18}$$

i ekvivalentna dubina ukopa:

$$h_e = \sqrt{r_e^2 + h^2} \tag{11.4–19}$$

Prema [L1] izrazi (11.4–18) i (11.4–19) vrijede ako je ekvivalentni polumjer:

$$r_e \leq \frac{h}{\sqrt{3}} \tag{11.4–20}$$

Za uobičajene dubine polaganja trakastih uzemljivača (od 0,5 do 0,7 m) r_e iznosi od 0,29 do 0,40 m.

Kod velikih struja munje i velike otpornosti tla, zona ionizacije približava se površini zemlje, pa se dobiva da je ekvivalentni vodič smješten na površini zemlje. Tada se parametri trakastog uzemljivača računaju uz uvjet da je:

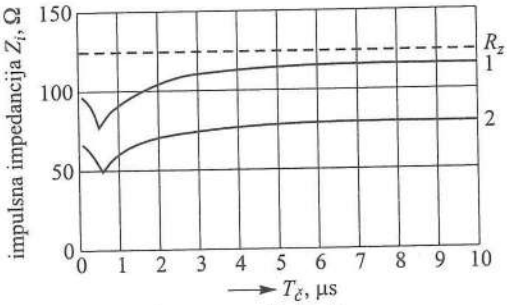
$$r_e > \frac{h}{\sqrt{3}}$$

$$G_1 = \frac{\pi}{\rho_z\left(\ln\frac{2l}{r_e} - 1\right)}, \quad L_1 = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\ln\frac{2l}{r_e} - 1\right), \quad C_1 = \frac{\pi\varepsilon_o(1+\varepsilon_r)}{\left(\ln\frac{2l}{r_e} - 1\right)} \tag{11.4–21}$$

11.4.3. Neki napuci za projektiranje i proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i

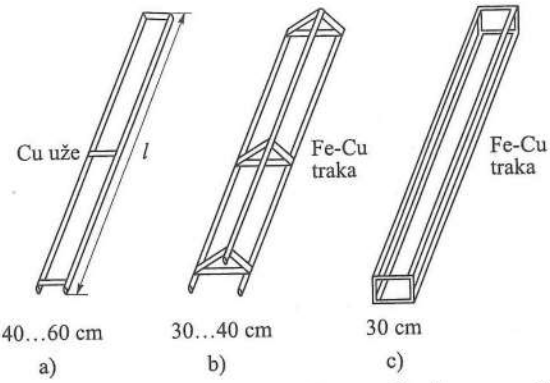
- Prema [45] relativna dielektrična konstanta tla nalazi se u granicama od 4 do 70. Prva je vrijednost za suho tlo, a druga za destiliranu vodu.
- Trajanje čela $T_č$ može se uzeti u granicama od 1,8 do 4,5 μs. Tako prema [L6] 95 % gromova ima trajanje čela vala duže od 1,8 μs, a 50 % gromova ima trajanje čela vala duže od 4,5 μs.
- Za veliku otpornost tla $\rho_z > 2000$ Ωm impulsna impedancija uzemljivača Z_i postaje manja od stacionarnog otpora uzemljenja, dakle $Z_i < R_z$, što je veoma povoljno.

- Za veoma malu otpornost tla ($\rho_z < 100\ \Omega$m) prilično je izražen utjecaj induktiviteta uzemljivača, tako da je manji utjecaj duljine uzemljivača l, te je Z_i približno isti za $l = 10$ m i $l = 30$ m pri $T_č = 4$ μs i veći je od R_z ($Z_i > R_z$).
- Poseban su problem nesigurni ulazni podaci kao što su to otpornost tla ρ_z, dielektričnost tla ε_r, jakost električnog polja E, amplituda struje groma I_u i trajanje čela strujnog vala $T_č$.
- U [45] dan je primjer $Z_i = f(T_č)$, slika 11.4–5.
- U [45] dane su konstrukcije impulsnih uzemljivača s više paralelnih vodiča, slika 11.4–6.
- Koristeći se američkim iskustvima [4, 32] autor je dao različite konstrukcije impulsnih uzemljivača, slika 11.4–7, koristeći se povoljnim djelovanjem štapnih uzemljivača i kratkih trakastih uzemljivača (za duljine do 20 m).

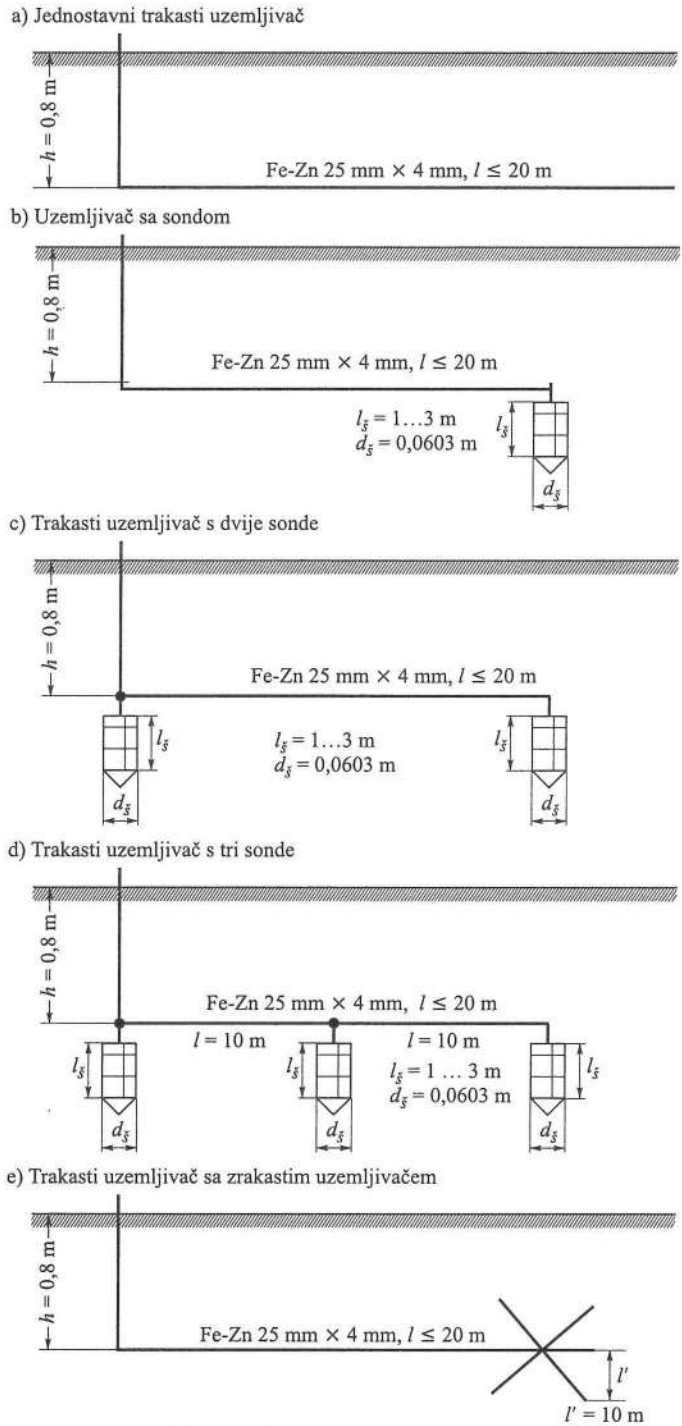


- - - - - stacionarni otpor uzemljenja R_z
1 – bez utjecaja ionizacije ($T_č = 2$ μs, $Z_{i1} = 104\ \Omega$)
2 – s utjecajem ionizacije ($T_č = 2$ μs, $Z_{i2} = 65\ \Omega$, $r_e = 20$ cm)
$l = 30$ m $\rho_z = 2000\ \Omega$m
$I_u = 20$ kA $E_k = 10$ kV/cm

Sl. 11.4–5. Impulsna impedancija uzemljenja Z_i trakastog uzemljivača u ovisnosti trajanja čela vala $T_č$ za tlo bez utjecaja ionizacije (krivulja 1) i s utjecajem ionizacije (krivulja 2).

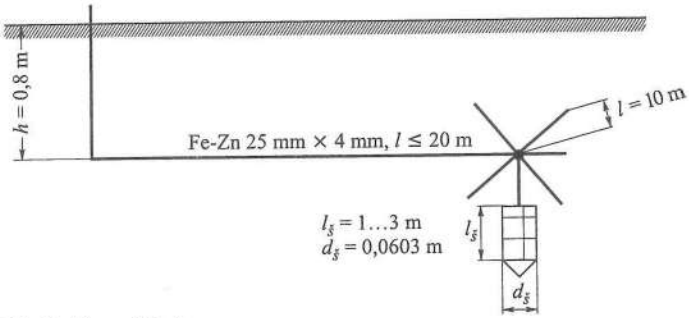


Sl. 11.4–6. Konstrukcija impulsnih uzemljivača prema [45].

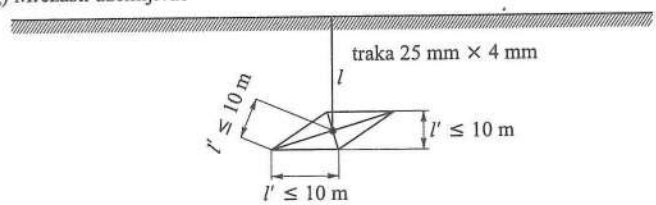


Sl. 11.4–7. Konstrukcije različitih trakastih i složenih impulsnih uzemljivača.

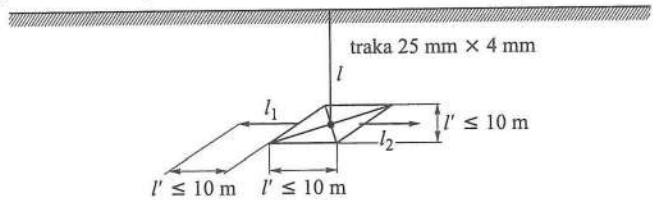
f) Trakasti sa zrakastim i štapnim uzemljivačem



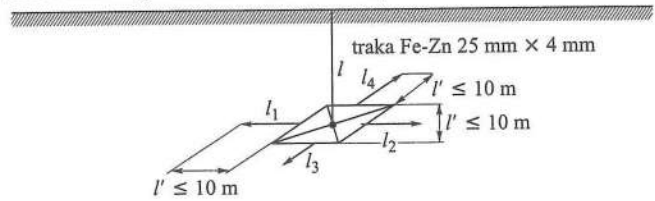
g) Mrežasti uzemljivač



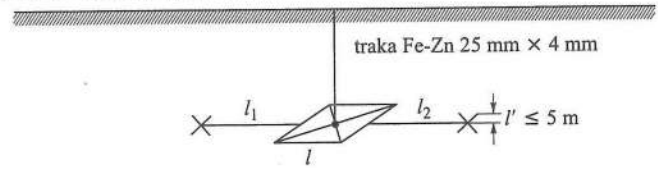
h) Mrežasti uzemljivač s dva zrakasta uzemljivača



i) Mrežasti uzemljivač s četiri zrakasta uzemljivača

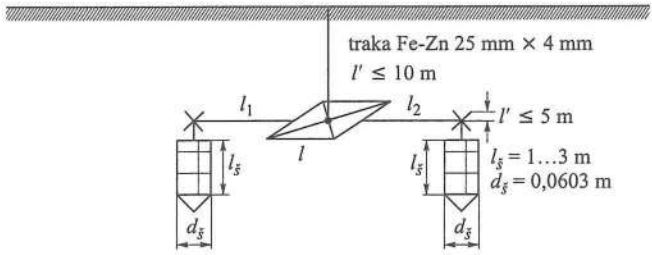


j) Kombinirani uzemljivač s trakastim uzemljivačima

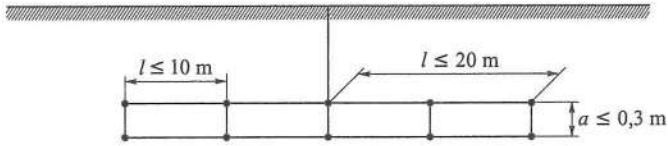


Sl. 11.4–7. Konstrukcije različitih trakastih i složenih impulsnih uzemljivača – nastavak.

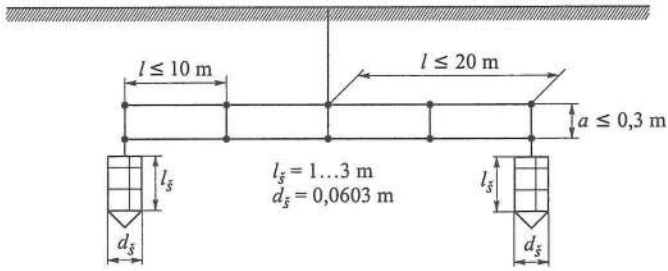
k) Kombinirani uzemljivač s dva štapna uzemljivača



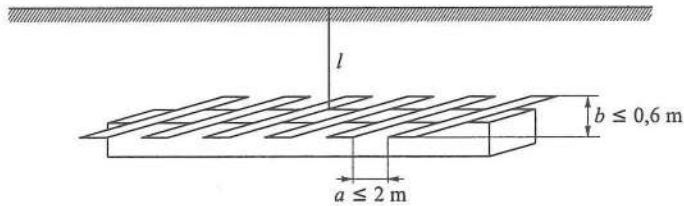
l) Kombinirani uzemljivač s paralelnim i poprečnim vodičima



m) Kombinirani uzemljivač s poprečnim paralelnim vodičima i štapnim uzemljivačima



n) Složeni uzemljivač



Sl. 11.4–7. Konstrukcije različitih trakastih i složenih impulsnih uzemljivača – nastavak.

Primjer 11B

Treba izračunati impulsnu impedanciju Z_i, otpor uzemljenja R_z i impulsni koeficijent α_i za trakasti uzemljivač sljedećih podataka:

– duljina trakastog uzemljivača: $l = 20$, 40, 60 i 80 m

– dubina ukopa: $h = 0{,}8$ m

– materijal je željezna pocinčana traka 25 mm × 4 mm, $r = d/2 = (25:2):2 = 6{,}25$ mm

– relativna dielektrična konstanta: od 4 do 70, proizvoljno je odabrana $\varepsilon_r = 21$
– otpornost tla: $\rho_z = 100$, 200 i 400 Ωm
– trajanje čela vala: od 1,8 do 4 μs, odabrano je $T_č = 2$ i 4 μs.

U tablici 11.4–2 dani su rezultati izračuna impulsne impedancije Z_i, otpora uzemljenja R_z po formuli (11.4–14) i impulsnog koeficijenta α_i po formuli (11.4–1) za gore navedene podatke i $T_č = 2$ μs, a u tablici 11.4–3 za iste podatke, ali za $T_č = 4$ μs.

Tablica 11.4–2. Izračun Z_i, R_z i α_i za impulsni trakasti uzemljivač duljine l pri otpornosti tla ρ_z za $\varepsilon_r = 21$, $h = 8$ m, $r = 6{,}25 \times 10^{-3}$ m, $T_č = 2$ μs.

l, m	ρ_z, Ω	R_z, Ω	Z_i, Ω	$\alpha_i = \frac{Z_i}{R_z}$
20	100	8,43	10,86	1,29
40	100	4,67	11,03	2,36
60	100	3,39	12,62	3,72
80	100	2,66	14,91	5,60
20	200	16,86	18,57	1,10
40	200	9,34	14,62	1,57
60	200	6,78	16,82	2,48
80	200	5,32	20,39	3,83
20	400	33,72	34,16	1,01
40	400	18,68	24,23	1,30
60	400	13,56	24,70	1,82
80	400	10,64	24,58	2,31

Tablica 11.4–3. Isto kao u tablici 11.4–2 samo za trajanje čela vala $T_č = 4$ μs prema [45].

l, m	ρ_z, Ω	R_z, Ω	Z_i, Ω	$\alpha_i = \frac{Z_i}{R_z}$
20	100	8,43	9,42	1,12
40	100	4,67	7,91	1,70
60	100	3,39	8,34	2,46
80	100	2,66	9,80	3,68
20	200	16,86	17,22	1,02
40	200	9,34	11,85	1,29
60	200	6,78	11,88	1,75
80	200	5,32	12,40	2,33
20	400	33,72	33,75	1,02
40	400	18,68	21,02	1,13
60	400	13,56	18,19	1,32
80	400	10,64	17,63	1,66

11.5. TRANZIJENTNE KARAKTERISTIKE IMPULSNIH UZEMLJIVAČA [43]

Prikazana je nova metoda proračuna tranzijentnih uzemljivačkih sustava. Umjesto dosada primjenjivanih jednostavnih modela uzemljivača modeliranih vodovima s gubicima, uveden je na osnovi numeričkih modela za rješavanje elektromagnetskih polja frekvencijski ovisan radijacijski model. U frekvencijskoj domeni rješavaju se integralne jednadžbe polja primjenom tzv. momentnih metoda, a rješenje se transformira u vremensku domenu primjenom Fourierove transformacije. Utjecaj površine zemlje uračunan je s pomoću numeričkog rješavanja Sommerfeldovih integrala.

Nova metoda proračuna omogućava bitno točniju analizu tranzijentnoga elektromagnetskog ponašanja uzemljivačkih sustava, posebno u slučajevima proračuna u vremenima uspona impulsa, kao i u slučajevima uzemljivača složenije strukture. Prikazani su rezultati proračuna, izvedeni primjenom razvijenoga programskog sustava za digitalno računalo.

11.5.1. Opis modela

Uzemljivački sustavi često se nalaze u impulsnom načinu rada, koji je karakterističan za atmosferska pražnjenja, u slučajevima kvara na opremi, pri manipulacijama u elektroenergetskim sustavima i sl. Kako se može raditi o veoma brzo promjenjivim impulsima, nastaju veoma složeni elektromagnetski procesi. Poznavanje tih procesa osnova je za ispravno dimenzioniranje zaštite od atmosferskih pražnjenja.

Uzemljivački sustav modelira se kao skup spojenih ravnih i tankih cilindričnih segmenata proizvoljnoga međusobnog položaja. Takav model obuhvaća gotovo sve važne slučajeve u praksi, isključujući pločasti uzemljivač.

Na takav se način, rješavajući za ustaljenu harmoničku pobudu u širem frekvencijskom opsegu, dobije funkcija sustava. U tom slučaju to je ulazna impedancija. Tražena tranzijentna impedancija za proizvoljni vremenski oblik pobude dobije se primjenom inverzne Fourierove transformacije, čime se rješenje iz frekvencijskog transformira u vremensko područje.

11.5.2. Tranzijentna impedancija uzemljivačkog sustava $Z_t(t)$

Analizira se uzemljivački sustav pod režimom strujne pobude proizvoljne vremenske ovisnosti $i_z(t)$. Analizira se slučaj kada se struja pobude injektira u uzemljivač u jednoj točki. Tada je moguće, odredivši napon te točke prema neutralnoj zemlji $u_z(t)$, definirati tranzijentnu impedanciju uzemljivačkog sustava $z_t(t)$:

$$z_t(t) = -\frac{u_z(t)}{i_z(t)} \tag{11.5–1}$$

Jedan je od slučajeva za koje se takvi pojednostavnjeni model s dosta uspjeha može primijeniti je dugi tanki ravni vodoravni vodič ukopan u zemlju (to jest trakasti uzemljivač). Takav se uzemljivač modelira kao vod s gubicima. Parametri kao što su

serijska otpornost i induktivnost i paralelna odvodnost i kapacitivnost određuju se na osnovi kvazistacionarne analize za beskonačno dugi vodič. Tranzijentni odziv dobiva se primjenom Laplaceove transformacije i rješavanjem odgovarajuće telegrafske jednadžbe.

Rezultati proračuna na takvom modelu u skladu su s mjerenjima, ali nije moguća analiza u stvarnom vremenu nakon početka impulsa. Isto tako nije moguće analizirati složenije oblike uzemljivača u slučajevima kada je nužno uračunati međusobne utjecaje između dijelova uzemljivačkog sustava.

Ako se kao pobuđena funkcija izabere Diracov delta impuls, čiji je Fourierov transformat jednak jedinici, Fourierova je transformacija odgovarajućeg odziva tzv. funkcija sustava. To znači da je, ako se odredi vrijednost napona točke prema neutralnoj točki za ustaljenu harmonijsku pobudu od 1 A, za sve frekvencije od nule do beskonačnosti određena tražena funkcija sustava. Kako su u tom slučaju napon i impedancija po veličini međusobno jednaki, dobivena je vrijednost ulazne impedancije $Z_t(j\omega)$.

Kada se na taj način jednom odredi $Z_t(j\omega)$, omogućena je jedinstvena analiza odziva za proizvoljne funkcije pobude $i_z(t)$. Potrebno je odrediti Fourierovu transformaciju $I_z(j\omega)$, a odziv u frekvencijskoj domeni dobiva se jednostavnom operacijom:

$$U_z(j\omega) = Z_t(j\omega) \cdot I_z(j\omega) \tag{11.5–2}$$

Uporabom inverzne Fourierove transformacije odredi se $u_z(t)$ i konačna tranzijentna impedancija:

$$z_z(t) = \frac{F^{-1}\{Z_t(j\omega) \cdot F[i_z(t)]\}}{i_z(t)} \tag{11.5–3}$$

gdje su F i F^{-1} Fourierova i inverzna Fourierova transformacija, a $U_z(j\omega)$, $I_z(j\omega)$ i $Z_t(j\omega)$ Fourierovi transformatori napona, struje i impedancije.

Opisani postupak moguć je uz pretpostavku da je sustav linearan. To znači da se ne mogu modelirati nelinearne pojave s ionizacijom zemlje koja se pojavljuje pri protjecanju velikih struja. To je, istina, ograničenje postupka proračuna, ali treba imati u vidu da se ionizacija zemlje pojavljuje uglavnom kod manjih uzemljivača s veoma velikom jakošću struje, a gotovo se uopće ne pojavljuje kod prostranijih uzemljivačkih sustava za stvarne vrijednosti struje [L2].

Usvojene su sljedeće pretpostavke.

- Zemlja i zrak beskonačni su, homogeni, linearni i izotropni poluprostori, razdvojeni ravnom površinom. Zemlja je električno karakterizirana proizvoljnim vrijednostima: G_1, ε i u, a zrak je karakteriziran uobičajenim vrijednostima ε_0 i μ_0.
- Model je uzemljivača dio po dio linearan, tj. sastavljen od skupa spojenih ili rastavljenih ravnih segmenata, pri čemu se eventualni nekružni poprečni presjeci segmenata modeliraju ekvivalentnim kružnima. Duljina segmenata mnogo je veća od promjera, a promjer je manji od najmanje primjenjene valne duljine. Segmenti vode struju jedino u svojoj geometrijskoj osi.
- Napajanje je iz idealnoga strujnog izvora, kojim se injektira struja u uzemljivač.

11.5.3. Matematički model

Prvi je korak ka rješenju problema u frekvencijskom području uz zanemarivanje površine zemlje, tj. uz pretpostavku da se uzemljivač nalazi u homogenom prostoru beskonačnih dimenzija.

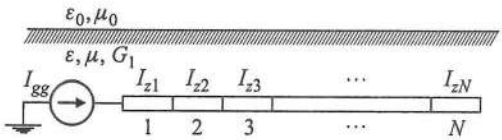
Polazeći od Maxwellovih jednadžbi i odgovarajućih graničnih uvjeta, može se izvesti pogodan oblik integralne jednadžbe, tzv. potencijalne integralne jednadžbe električnog polja. Usvojivši da su koordinatni počeci iz osi z lokalnoga cilindričnog koordinatnog sustava u središnjoj točki i geometrijskoj osi jednog segmenta modela. Za taj segment jednadžba električnog polja polja [L3] izgleda, prema slici 11.5–1

$$E_z^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I_z(z')\cdot G(z,z')\mathrm{d}z' + \frac{j\omega}{4\pi(j\omega\varepsilon+\sigma)}\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} q(z')\frac{\partial}{\partial z}G(z,z')\mathrm{d}z' \tag{11.5–4}$$

gdje je:

$$G(z,z') = \frac{e^{-\gamma r}}{r}, \quad r = \sqrt{(z-z')^2 + a^2} \tag{11.5–5}$$

a je polumjer segmenta vodiča uzemljivača.



E_z^i tangencijalna komponenta incidentnog električnog polja na površini vodiča uzemljivača

$I_z(z')$ struja u osi segmenta vodiča uzemljivača

$q(z')$ naboj u osi segmenta vodiča uzemljivača

Slika 11.5–1. Model uzemljivačke elektrode sastavljen od ravnih segmenata.

Jednadžba (11.5–4) rješava se numeričkim postupcima, uporabom tzv. momentnih metoda [L4]. U osnovi je sljedeća pretpostavka: na strukturi uzemljivača pretpostavi se opći oblik raspodjele struje, u ovom slučaju to je stepeničasta funkcija, takva da je struja na svakom segmentu konstantna, ali nepoznate jakosti. Usvajanjem zahtjeva da su granični uvjeti zadovoljeni jedino u središnim točkama segmenta, jednadžba (11.5–4) rješava se za svaki par segmenata. Tako se dobiva sustav linearnih algebarskih jednadžbi, čime je jednadžba (11.5–4) reducirana u sljedeću matričnu jednadžbu:

$$[Z_t]\cdot[I_z] = [U_z] \tag{11.5–6}$$

Elementi matrice $[Z_t]$ opisuju elektromagnetske interakcije između segmenata, elementi matrice $[I_z]$ nepoznati su koeficijenti struje u segmentima, a elementi matrice $[U_z]$ povezani su s naponom na segmentima zbog neovisne pobude. Taj oblik matrične jednadžbe izravno se može primijeniti ako je napajanje iz naponskog izvora. Kako je ovdje napajanje iz strujnog izvora, potrebno je preinačiti jednadžbu (11.5–6).

Ako je struktura na slici 11.5–1 podijeljena na N segmenata i ako je strujni izvor spojen s prvim segmentom, tada su svi elementi matrice $[U_z]$ jednaki nuli, a koeficijent struje na prvom segmentu jednak je struji strujnog izvora, ovdje 1 A.

Sustav jednadžbi:

$$\sum_{j=1}^{N} I_j Z_{tij} = k, \quad i = 2, 3, \cdots N \tag{11.5–7}$$

kompletira se jednadžbom:

$$I_{z1} = I_{gg} \tag{11.5–8}$$

Tako modificirana matrična jednadžba izgleda [L3] ovako:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ Z_{t21} & Z_{t22} & Z_{t23} & \dots & Z_{t2N} \\ Z_{t31} & Z_{t32} & Z_{t33} & \dots & Z_{t3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{tN1} & Z_{tN2} & Z_{tN3} & \dots & Z_{tNN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{z1} \\ I_{z2} \\ I_{z3} \\ \vdots \\ I_{zN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gg} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{11.5–9}$$

Kada se rješivši (11.5–9) odrede vrijednosti koeficijenta I_j, raspodjela struje, npr. na ravnoj elektrodi na slici 11.5–1, dana je:

$$i_z(z) = \sum_{j=1}^{N} I_{zj} f_j(z_z) \tag{11.5–10}$$

gdje su f_j definirane kao jedinični pravokutni impulsi na segmentima

$$f_j(z) = \begin{cases} 1; \ Z_t \text{ je na segmentu } j \\ 0; \ Z_t \text{ nije na segmentu } j \end{cases}$$

Ako je raspodjela struje (11.5–10) poznata, može se izračunati električno polje u okolini. Integriranjem tog polja od točke napajanja, teorijski do beskonačnosti, a praktično do određene udaljenosti, odredi se napon točke napajanja prema neutralnoj točki [L3].

11.5.4. Rješenje ispod površine zemlje

Dobiveno rješenje u homogenom prostoru može se proširiti na prostor ispod površine zemlje. To je ovdje učinjeno modifikacijom integralne jednadžbe (11.5–4), pa tako cjelokupni proračun u homogenom prostoru i dalje vrijedi.

Postupak se zasniva na proračunu Greenove funkcije kao električnog polja od elementarnoga električnog dipola ispod površine zemlje. To dovodi do potrebe rješa-

vanja Sommerfeldovih integrala, koji su rješavani izravnim numeričkim integriranjem [L4]. To je najtočniji raspoloživi postupak proračuna, ali je cijena veoma velik utrošak vremena na računalu.

Iako je na taj način moguće provesti proračun samo za manje strukture uzemljivača, takvi dosad najtočniji proračuni omogućuju bitno točniju analizu, a s druge strane čine osnovu za daljnje usavršavanje postupka proračuna, kao i osnovu za ispitivanje jednostavnijih postupaka.

Tim je, u stvari, i upotpunjeno rješenje u frekvencijskom području. Rješenje se transformira u vremenskom području primjenom inverzne Fourierove transformacije.

11.5.5. Sinteza odziva u vremenskoj domeni

Inverznu Fourierovu transformaciju u (11.5–3) moguće je provesti jedino numeričkim postupkom, tzv. diskretnom Fourierovom transformacijom (DIFT) [L5]. Pritom se, u općem slučaju, beskonačni frekvencijski opseg i vremenski interval ograniče do nekih vrijednosti f_m i T_m, a u općem slučaju, kontinuirane funkcije u vremenskom i frekvencijskom području izraze nizom diskretnih vrijednosti. Pored f_m i T_m, vrijednosti područja Δt i Δf osnovni su parametri DIFT-a. Pritom trebaju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$T_{\text{maks}} \cong \frac{1}{\Delta f} \quad \Delta t_t \cong \frac{1}{2 f_m} \tag{11.5–11}$$

Ograničenje spektra i vremenskog intervala pretpostavlja da se komponente na većim vrijednostima frekvencija i vremena mogu smatrati jednakim nuli. Parametre DIFT-a treba pažljivo odrediti, jer bitno utječu na točnost proračuna.

U do sada razvijenim metodama proračuna uvijek se primjenjuje kvazistacionarna analiza na osnovi spoznaje da se frekvencijski opseg može ograničiti na 1 MHz. Ali, analiza u [L3] pokazuje da f_m treba odrediti na osnovi vremena u kojem se pojavljuje najranija potrebna informacija u tranzijentnom odzivu. Tako se npr. bitna najviša vrijednost tranzijentne impedancije može pojaviti i prije vremena od 10 ns od početka impulsa, pa prema tome, na osnovi (11.5–11), f_m treba biti veći od 50 MHz.

Praktično se DIFT proračunava primjenom računala s pomoću algoritma brze Fourierove transformacije (FFT) [L5]. Da se svede na najmanju mjeru broj izravnih rješavanja odbiraka $Z_t(j\omega)$, razvijen je adaptivni algoritam, kojim se svuda gdje je moguće potrebne vrijednosti, umjesto izravnim rješavanjem, dobivaju interpolacijom [L3].

11.5.6. Rezultati proračuna

Analizom rezultata proračuna vodiča na raznim dubinama ispod površine zemlje, počevši od desetak centimetara do beskonačnosti, što odgovara slučaju homogenog prostora, utvrđeno je da se oblik funkcije tranzijentnog odziva neznatno mijenja promjenom dubine. Mijenjaju se samo vrijednosti. Promjena dubine najčešće djeluje kao da se funkcija odziva vodiča ispod zemlje dobiva translacijom funkcije, koja

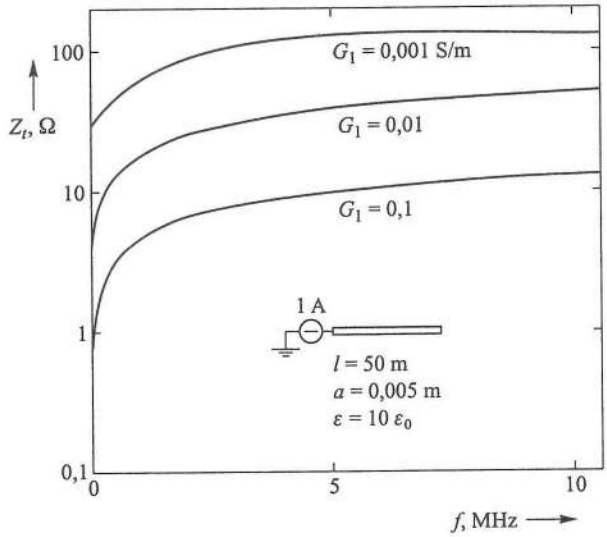
odgovara slučaju homogenog prostora. S druge strane, poslije određene dubine, koja je često oko 2 m [L3, L6], tranzijentno ponašanje uzemljivača ne mijenja se s daljnjim povećanjem dubine, pa je ono, zapravo, jednako kao u slučaju homogenog prostora. To ukazuje da su proračuni u homogenom prostoru korisni za analizu raznih aspekata tranzijentnog ponašanja uzemljivačkih sistema.

Slike 11.5–2 – 11.5–5 prikazuju rezultate proračuna tranzijentne impedancije ravnog vodiča duljine $l = 50$ m i polumjera $a = 5$ mm, za vrijednosti G_1 homogenog prostora 0,1; 0,01 i 0,001 S/m i vrijednosti $\varepsilon = 10\varepsilon_0$ i $\mu = \mu_0$. Vodič je napajan na jednom kraju strujnim izvorom, pri čemu je impuls napajanja tzv. dvostruka eksponencijalna funkcija [L7]:

$$i(t) = I_u\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) \tag{11.5–12}$$

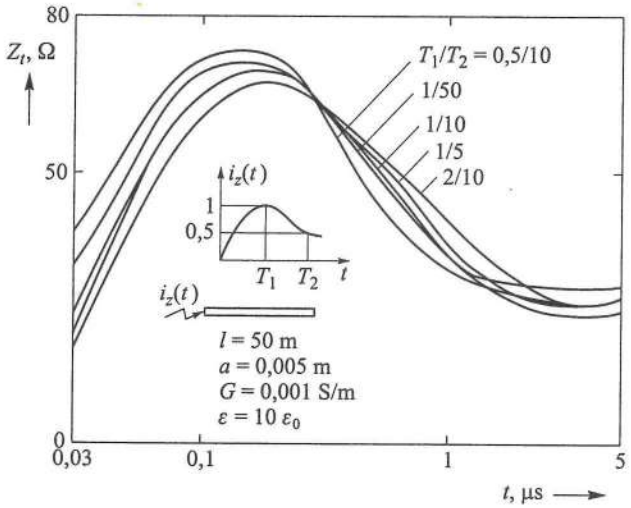
Koeficijenti α i β dvostruke eksponencijalne funkcije impulsne struje, u formuli (11.5–12) definiraju se na osnovi vrijednosti vremena uspona impulsa T_1, definiranog kao vrijeme od početka do postizanja najveće vrijednosti impulsa i vremena trajanja T_2, definiranog kao vrijeme od početka do opadanja vrijednosti na polovicu najveće vrijednosti. Na slici 11.5–2 dani su spektri ulazne impedancije, a na slikama 11.5–3, 11.5–4 i 11.5–5 tranzijentne impedancije za pet vrijednosti i to $T_1/T_2 = 1/5$; $1/10$; $1/50$; $0{,}5/10$ i $2/10$.

Slično kao što oblici spektra na slici 11.5–2 nalikuju jedan drugome, tako su i oblici odziva u vremenskoj domeni na slici 11.5–3; 11.5–4 i 11.5–5 u osnovi međusobno slični. Pri tome se mogu uočiti određene tendencije. S porastom vrijednosti raste utjecaj promjene oblika impulsa pobude na oblik tranzijentne impedancije, s time da se istodobno primjećuje određeno pomicanje tranzijentnog razdoblja ka ranijim vremenima.



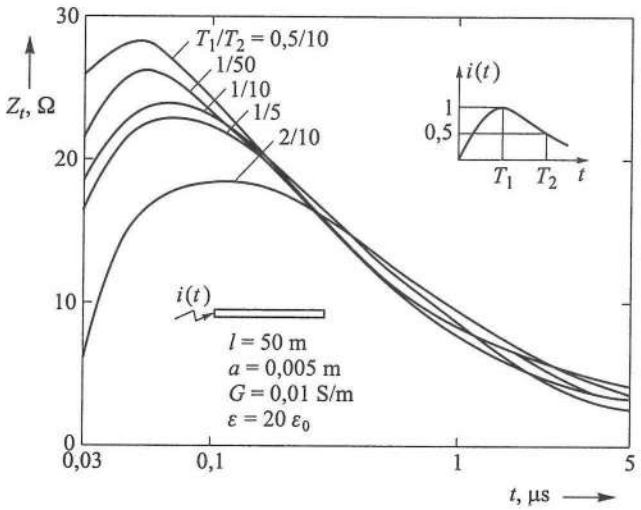
Sl. 11.5–2. Spektri ulazne impedancije pravolinijske elektrode duljine 50 m u vodljivoj sredini.

Primjećuje se karakteristični utjecaj raznih oblika impulsa: kraće T_1 povećava vrijednost maksimuma, a dulje T_2 ima sličan utjecaj, ali u mnogo manjem opsegu. Veoma je značajna karakteristika, što promjene vrijednosti T_1/T_2 nemaju gotovo nikakav utjecaj na trajanje tranzijentnog razdoblja, pa, kako se sa slike 11.5–3; 11.5–4 i 11.5–5 vidi, za impulse kod kojih se T_1 mijenja od 0,5 do 2 μs i T_2 od 5 do 50 μs tranzijentna razdoblja traju gotovo podjednako i smirivanje na vrijednost stacionarne impedancije nastaje gotovo istodobno.

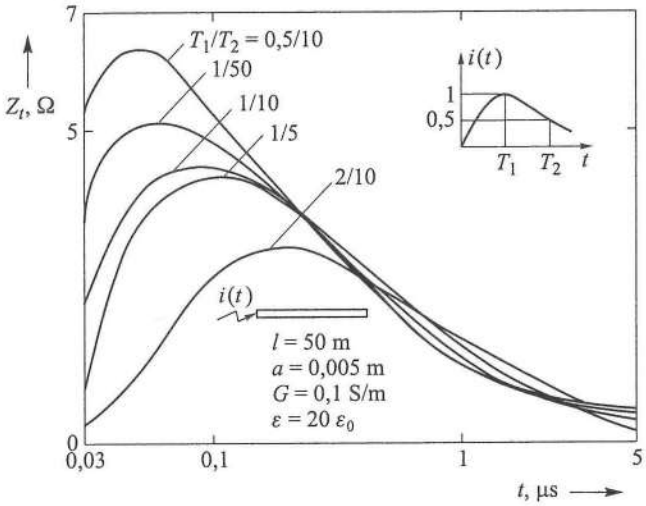


l	duljina vodiča uzemljivača
a	polumjer segmenta vodiča uzemljivača
T_1, T_2	vrijeme trajanja čela i hrpta impulsa
$i_z(t)$, $u_z(t)$	vremenske funkcije struje i napona

Sl. 11.5–3. Tranzijentna impedancija ravne elektrode duljine 50 m u vodljivoj sredini, $G_1 = 0,001$ S/m, za dvostruki eksponencijalni impuls pobude.



Sl. 11.5–4. Tranzijentna impedancija ravne elektrode duljine 50 m u vodljivoj sredini $G_1 = 0,01$ S/m, za dvostruki eksponencijalni impuls pobude.



Sl. 11.5–5. Tranzijentna impedancija ravne elektrode duljine 50 m u vodljivoj sredini $G_1 = 0{,}1$ S/m, za dvostruki eksponencijalni impuls pobude.

11.6. IMPULSNI UZEMLJIVAČI U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Uzemljivački sustav bitan je elemenat za normalno funkcioniranje elektroenergetskih sustava. Osnovne funkcije uzemljivačkog sustava mogu se svesti na sljedeće:

- radno uzemljenje neutralne točke sustava
- odvođenje struja i atmosferskih pražnjenja
- osiguranje ljudi u postrojenjima i okolini visokonaponskih dalekovoda
- funkcioniranje relejne zaštite.

Razmatrajući proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije, uzemljivački sustav može se podijeliti u dvije velike skupine:

- uzemljivački sustavi visokonaponskih postrojenja
- uzemljivački sustavi dalekovodnih stupova.

Uzemljivački sustav visokonaponskih postrojenja u pravilu obuhvaća prostor na kojem se postrojenje nalazi. Sastavljen je od vodoravnih vodiča (bakreno uže, pocinčana traka) i uspravnih štapova. Vodoravni vodiči postavljaju se tako da čine mrežu koja (pored zadovoljavanja radnih uvjeta elektroenergetskog sustava) mora pružiti sigurnost s obzirom na dopuštene iznose napona dodira i napona koraka. U većini slučajeva mreža vodoravnih vodiča može zadovoljiti sve propisane uvjete, a samo u određenom broju posebnih situacija (izražena nehomogenost tla, visoka otpornost tla) potrebno je na mrežu vodoravnih vodiča dodati određen broj uspravnih štapova.

Uzemljivački sustavi dalekovodnih stupova postavljaju se na svaki dalekovodni stup i u pravilu zauzimaju relativno mali prostor, sastoje se od:

- metalne konstrukcije dalekovodnog stupa koja je ukopana u zemlju
- betonskog temelja stupa
- uspravnih štapova
- prstenastih vodiča
- vodoravnih vodiča.

S obzirom na veliki broj dalekovodnih stupova, pri čemu je znatan broj stupova često na vrlo nepristupačnom i za polaganje uzemljivača teškom terenu, a vodeći računa o cijeni izgradnje dalekovoda, nastoji se uzemljivače izgraditi tako da zauzimaju što manje prostora, uz najmanji broj i veličinu elemenata od kojih su sastavljeni.

Otpor uzemljenja uzemljivačkih sustava bitna je veličina za karakteriziranje uzemljivačkog sustava. Ta veličina karakterizira ponašanje uzemljivačkog sustava pri istosmjernom naponu, a sa zadovoljavajućom točnosti opisuje ponašanje uzemljivača pri odvođenju struja industrijske frekvencije.

Međutim, pri odvođenju struje atmosferskog praženjenja (impulsna visokofrekvencijska pojava) dolazi do izražaja induktivnost komponenata iz kojih se sastoji uzemljivački sustav, te se u tom slučaju mora govoriti o impedanciji uzemljivačkog sustava.

Vodeći računa o prednjem, karakteristike uzemljivačkog sustava se dijele na:

- stacionarne karakteristike,
- impulsne karakteristike.

Stacionarne karakteristike određuje ponašanje uzemljivača pri odvođenju struja kvara i bitne su za projektiranje uzemljivača s obzirom na uzemljenje neutralne točke i sigurnost ljudi. Impulsne karakteristike povezane su prije svega s pojavom tzv. povratnog preskoka. Povratni preskok pojava je (koja će se kasnije detaljnije objasniti) koja se sastoji u tome da udar groma u dalekovodni stup ili gromobransku instalaciju postrojenja može izazvati preskok s konstrukcije stupa odnosno gromobranske instalacije na fazne vodiče stvarajući pri tome iznimno strmi prenaponski val. Preskok na izolatorskom lancu ostavlja sustav u zemljospoju, tako da prekidači u sustavu automatskoga ponovnog uklopa moraju eliminirati zemljospoj. Strmi prenaponski val nastao zbog povratnog preskoka u blizini postrojenja ili u samom postrojenju posebno je opasan za izolaciju opreme unutar postrojenja, te se tom problemu mora posvetiti posebna pozornost.

Gromobranska instalacija visokonaponskih postrojenja sastoji se od gromobranske užadi ili od gromobrana oblika šiljka. Udarom groma u gromobransku užad u postrojenju dolazi do grananja struje groma. S druge strane gromobrani oblika šiljka obično su postavljeni na metalnu konstrukciju (portale) postrojenja, te je i u tom slučaju omogućeno grananje struje groma. Vodeći računa o tome da visokonaponska postrojenja imaju daleko bolje uzemljivače nego dalekovodni stupovi, smatra se da je vjerojatnost nastanka povratnog preskoka unutar postrojenja iznimno mala.

Na osnovi toga može se zaključiti da impulsne karakteristike uzemljivača postrojenja nisu posebno važne za sprečavanje povratnih preskoka. Međutim, impulsne

karakteristike uzemljivača, odnosno dijelova uzemljivača visokonaponskih postrojenja, važne su kod odvođenja struja groma zbog udara groma u gromobransku instalaciju ili reagiranja odvodnika prenapona zbog nastanka lokalnih prenapona na dijelovima uzemljivačkog sustava. Lokalni prenaponi na uzemljivačkom sustavu mogu ugroziti sekundarne krugove ili opremu, te ih zbog toga treba kontrolirati.

Jedan od načina kontrole lokalnih prenapona nastalih zbog induktivnih efekata na dijelovima uzemljivača postavljanje je gušće mreže (i eventualno dodavanje štapnih uzemljivača) na mjestima gdje se gromobranska instalacija spaja na uzemljivački sustav i višestruko spajanje dozemnog voda odvodnika prenapona na čvorišta uzemljivačke mreže.

11.6.1. Uzemljenje stupova dalekovoda i povratni napon preskoka

a) Opis nastanka pojave

Udarom groma u dalekovodni stup ili u gromobransko uže nastaje valni proces u sustavu koji se sastoji od gromobranske užadi i faznih vodiča, dalekovodnih stupova, uzemljivača dalekovodnih stupova i kanala groma. Taj valni proces može prouzrokovati da se između krajeva jednog ili više izolatora pojavi potencijalna razlika koja može izazvati tzv. povratni preskok na izolatoru (izolatorskom lancu ili štapnom izolatoru).

Povratni preskok dovodi do strmih prenaponskih valova amplitude određene preskočnim naponom izolatora. Valovi putuju u oba smjera od mjesta nastanka kao putujući valovi (približno brzinom svjetlosti). Na mjestu preskoka sustav ostaje u zemljospoju.

Proces nastanka preskoka iznimnno je složen proces koji ovisi o velikom broju parametara. Zbog njegove složenosti potrebno je uvesti određen broj zanemarenja kako bi se prikladnim analizama dobili zadovoljavajući rezultati.

Za proučavanje nastanka preskoka poslužimo se pojednostavnjenim prikazom udara groma u vrh dalekovodnog stupa (v. sl. 11.6–1) (prikazan samo jedan fazni vodič). U trenutku udara groma u vrh stupa struja se groma grana na tri dijela: I_s, I_g, i I_g'.

b) Utjecajne veličine kod ocjene vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka

Na osnovi prethodnog razmatranja zaključuje se da je veliki broj parametara bitan kod ocjene vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka. Za kvalitetnu analizu potrebno je posebno obraditi sljedeće veličine.

Atmosfersko pražnjenje

Atmosfersko pražnjenje koje može biti pozitivnog ili negativnog polariteta, jednostruko ili višestruko, među oblacima ili između oblaka i zemlje, karakterizira se oblikom struje groma i frekvencijom pojave.

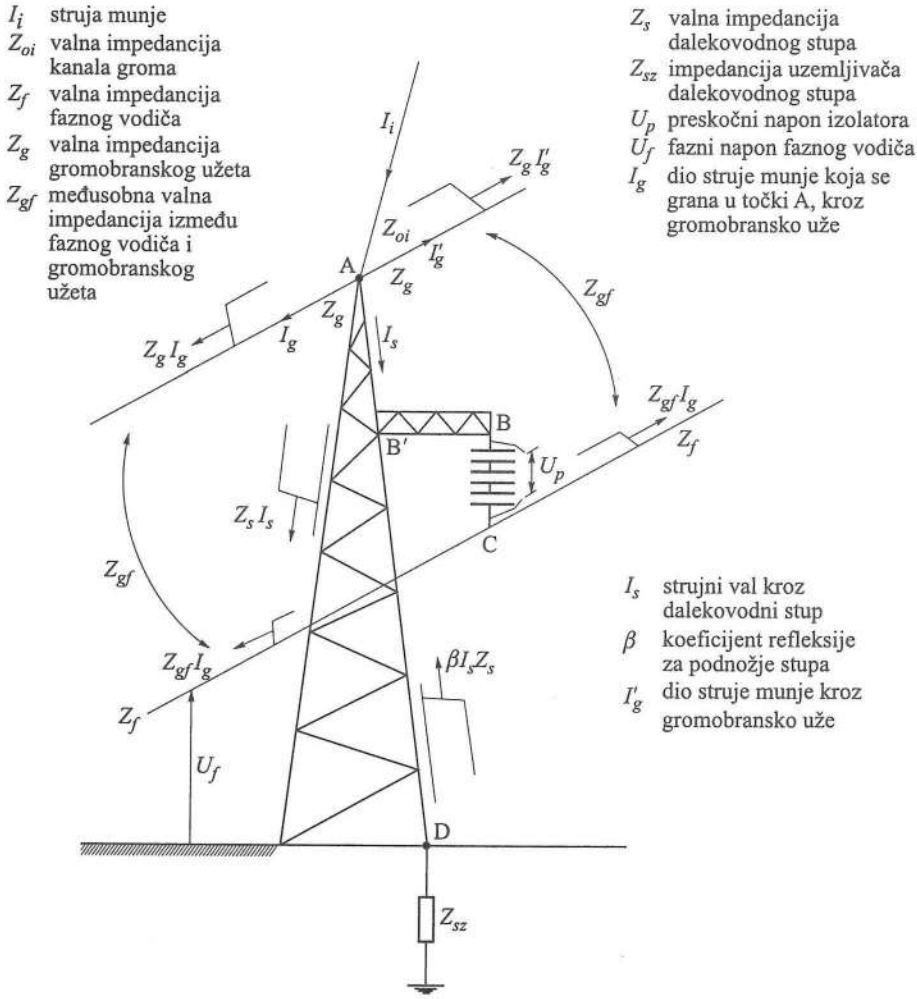
Za proračun vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka potrebno je znati broj udara groma u dalekovod tijekom jedne godine na 100 km dalekovoda. Ta se vrijednost približno određuje s pomoću izraza [L3]:

$$N_g = 0{,}004 \cdot G_d^{1,35} \cdot \left(b_g + 4h_{gs}^{1,09}\right) \qquad (11.6\text{–}1)$$

gdje je:

N_g broj udara groma u nadzemni vod na 100 km duljine tijekom godine
G_d izokeraunička razina (broj grmljavinskih dana u godini)
h_{gs} srednja visina gromobranskog užeta
b_g razmak između gromobranskih užeta.

Prethodni je izraz izveden na temelju približne relacije između izokerauničke razine i godišnjeg broja udara groma po četvornom kilometru područja kojim dalekovod prolazi. Za točnije određivanje godišnjeg broja udara groma po kvadratnom kilometru vrlo su važni podaci dobiveni odgovarajućim brojačima udara groma.



Slika 11.6–1. Prikaz valnog procesa na dalekovodnom stupu.

Amplituda i strmina čela struje groma sljedeći su važan skup podataka. Obje su veličine statističke veličine. U literaturi je dano dosta podataka o tim veličinama, a za praktične proračune mogu se upotrijebiti relacije iz [L3, L1] i vjerojatnost nastanka struje munje amplitude I_u:

$$p = \frac{1}{1+\left(\frac{I_u}{31}\right)^{2,6}} \tag{11.6–2}$$

Sa svakom od ove tri struje povezan je odgovarajući naponski val. Naponski valovi $Z_g \cdot I_g$ putuju duž gromobranske užadi i dolaskom do susjednih stupova (lijevo i desno od promatranog stupa) nailaze na točku diskontinuiteta i tu nastaje prelamanje i odbijanje vala. Reflektirani se valovi vraćaju ponovno u točku A, gdje također nastaje prelamanje i odbijanje. Budući da se dalekovodni stup može (uz određena zanemarenja) nadomjestiti ekvivalentnom valnom impedancijom, to od vrha stupa ka temeljima stupa putuje prenaponski val $Z_s \cdot I_s$ brzinom koja ovisi o konstrukciji stupa (0,7...0,9 brzine svjetlosti). Taj val biva reflektiran u točki diskontinuiteta (točka D) tako da se ka vrhu stupa vraća reflektirani val $\beta \cdot Z_s \cdot U_s$, pri čemu je β koeficijent refleksije.

Vremena dolaska reflektiranih valova ovise o vremenu putovanja, odnosno o brzini širenja vala i duljine puta (visina stupa i razmak između stupova i visine stupa na samom stupu će se dogoditi više prelamanja i odbijanja vala do trenutka dolaska vala reflektiranih od susjednih stupova).

Struja koja teče gromobranskom užadi zbog elektromagnetske indukcije inducira u faznim vodičima prenaponske valne ravnine $Z_{gf} \cdot I_g$ koje isto tako putuju približno brzinom svjetlosti i superponiraju se na fazni napon (oduzimaju ili zbrajaju u ovisnosti o polaritetu). Treba uočiti da se u tim analizama vrijednost faznog napona može smatrati konstantnom (jednakom trenutačnoj vrijednosti) zbog toga što se promatrani procesi događaju u mikrosekundnom području.

Valni proces opisan prethodno dovodi do porasta potencijala na vrhu stupa i na mjestu zavješenja izolatora (točka B), te u slučaju da razlika potencijala na izolatoru (između točaka B i C) prekorači iznos preskočnog napona U_p dolazi do preskoka, odnosno pojavljuje se povratni preskok (sa stupa na fazni vodič).

S' – srednja vrijednost strmine za struju munje amplitude I_u (kA)

$$S' = 6{,}6 \cdot I_u^{0,38}, \quad \frac{\text{kA}}{\text{ms}} \tag{11.6–3}$$

Za valni otpor kanala groma u literaturi se može naći puno različitih podataka (od 300...1000 Ω). Najnovija istraživanja [44] (TU München) pokazuju da se za valni otpor kanala groma može usvojiti vrijednost od 600 Ω.

Dalekovodni stup

Dalekovodni je stup metalno rešetkasta konstrukcija sastavljena od mnogo dijelova, te kao takva čini složeni vodič. Naime, svaki dio stupa ima svoj vlastiti otpor,

induktivitet i kapacitet kao i induktivitet i kapacitet prema drugim elementima stupa, faznim vodičima, gromobranskoj užadi i zemlji. Točno modeliranje takvog sustava izuzetno je složeno, posebno ako se uzme u obzir frekvencijska ovisnost parametara (grom je visokofrekventna pojava).

Zbog toga je izvršen veliki broj istraživanja s ciljem da se ustanovi što točniji model dalekovodnog stupa. Ustanovljeno je da je valna impedancija stupa frekvencijski ovisna, vremenski promjenljiva i promjenljiva duž osi stupa. Ove činjenice bitno kompliciraju modele za analizu valnih procesa, te se danas u većini slučajeva upotrebljava tzv. »model konstantne valne impedancije«. Za valne impedancije stupova daju se sljedeći približni izrazi [L2]:

$$Z_s = 30\ln\left[2\left(1+\frac{h_s^2}{r^2}\right)\right], \quad \Omega \tag{11.6–4}$$

ako se stup može aproksimirati stošcem visine h_s i polumjera osnove r

$$Z_s = 60\ln\left(\frac{hs}{r}+90\frac{r}{hs}-60\right), \quad \Omega \tag{11.6–5}$$

ako je stup valjkast, visine h_s i polumjera r.

Brzina širenja vala duž stupa iznosi (0,7...0,9) × brzina svjetlosti, a vrijeme putovanja određuje se s pomoću izraza:

$$T_s = \frac{h}{v_s} \tag{11.6–6}$$

gdje je:

T_s vrijeme prostiranja prenaponskog vala duž stupa dalekovoda, s

h visina stupa, m

v_s brzina prostiranja vala po stupu, m/s

Gromobranska užad i fazni vodiči

Električne karakteristike faznih vodiča i gromobranske užadi mogu se odrediti prikladnim računalnim programom. Taj pristup omogućava određivanje frekvencijske ovisnosti parametara zbog utjecaja zemlje i skin-efekta (efekta kože). Frekvencijski ovisni parametri visokonaponskih dalekovoda potrebni su kod vrlo točnog modeliranja prijelaznih pojava na dalekovodima.

Za određivanje vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka dovoljno je fazne vodiče i gromobransku užad zamijeniti odgovarajućim valnim impedancijama:

$$Z_g = 60\ln\left(\frac{2h_{gs}}{r_g}\right), \quad \Omega \tag{11.6–7}$$

$$Z_f = 60\ln\left(\frac{2h_f}{r_f}\right), \quad \Omega \tag{11.6–8}$$

$$Z_{gf} = Z_{fg} = 60 \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad \Omega \tag{11.6–9}$$

gdje je:

r_f polumjer faznog vodiča, m
h_{gs} srednja visina gromobranskog užeta, m
r_g polumjer gromobranskog užeta, m
h_f visina faznog vodiča, m
r_f polumjer faznog vodiča, m
b razmak između faznog vodiča i »slike« gromobranskog užeta (preslikavanje u odnosu na površinu zemlje), m
a razmak između faznog vodiča i gromobranskog užeta, m
Z_g valna impedancija gromobranskog užeta, Ω
Z_f valna impedancija faznog vodiča, Ω
Z_{gf} valna impedancija između faznog i gromobranskog vodiča, Ω
Z_s valna impedancija dalekovodnog stupa, Ω
Z_{sz} impedancija (otpor) uzemljenja dalekovodnog stupa, Ω.

S obzirom na to da prenaponski valovi na faznim vodičima i gromobranskoj užadi stvaraju koronu, to je katkad važno uzeti u obzir prigušenje vala zbog djelovanja koronskog izbijanja. Utjecaj korone može se uzeti u obzir preko tzv. ekvivalentnog polumjera korone koji je funkcija omjera napona vodiča i napona nastanka korone. U slučaju uzimanja u obzir prigušenja zbog djelovanja korone izraz za valnu impedanciju glasi:

$$Z_k = 60\sqrt{\ln\frac{2h_f}{r_f} \cdot \ln\frac{2h_f}{r_0}}, \quad \Omega \tag{11.6–10}$$

gdje je:

r_f polumjer faznog vodiča, m
Z_k valna impedancija voda pri djelovanju korone, Ω
h_f visina faznog vodiča, m
r_0 ekvivalentni polumjer korone, m.

Ekvivalentni polumjer korone ovisi o naponu na vodiču, naponu nastanka korone i o geometriji vodiča.

Preskočne karakteristike izolatora

Povratni preskok nastaje u trenutku kada je napon između krajeva izolatora veći od preskočnog napona. Poznato je da preskočni napon ovisi o strmini napona i da je dan preko tzv. »volt-sekundne karakteristike«. S obzirom na to da je napon na izolatoru, zbog valnog procesa na stupu, vremenski promjenljiv, za nastanak je preskoka potrebno da valni oblik napona na izolatoru dostigne (presječe) »volt-sekundnu karakteristiku« izolatora.

»Volt-sekundnu karakteristiku« izolatora koji ima preskočni razmak l_i (m) daje približni izraz [L3]:

$$V = K_{11} + \frac{K_{22}}{t^{0,75}}, \quad \text{mV} \tag{11.6–11}$$

gdje je:

V volt-sekundna karakteristika preskočnog napona na izolatoru, mV
l_i preskočni razmak, m
t vrijeme nastanka preskoka, ms
K_{11} koeficijent koji se prema [L3] izračuna: $K_{11} = 0{,}4 \cdot l_i$
K_{22} koeficijent koji se prema [L3] izračuna: $K_{22} = 0{,}71 \cdot l_i$.

Impedancija uzemljenja stupa

Uzemljivač dalekovodnog stupa igra vrlo važnu ulogu u nastanku povratnog preskoka. Promatrajući sliku 11.6–1 vidimo da se od točke diskontinuiteta u podnožju stupa (točka D) odbijaju valne amplitude

$$U_{od} = \beta \cdot U_{dg} \tag{11.6–12}$$

gdje je:

U_{dg} dolazeći prenaponski val
U_{od} odbijeni (reflektirani) prenaponski val
β koeficijent odbijanja prenaponskog vala u točki D promjene valnog otpora.

Koeficijent refleksije iznosi:

$$\beta = \frac{Z_{sz} - Z_s}{Z_{sz} + Z_s} \tag{11.6–13}$$

Budući da je gotovo uvijek $Z_s > Z_{sz}$, koeficijent je refleksije negativan, što znači da je reflektirani val suprotnog polariteta od dolazećeg vala. Prema tome, reflektirani valovi dijelom poništavaju dolazeće valove i na taj način doprinose smanjenju potencijala na vrhu stupa.

Manja impedancija uzemljenja znači reflektirani val veće amplitude odnosno veće poništavanje upadnog vala, što upravo ukazuje na bitan doprinos uzemljivača dalekovodnog stupa na smanjenje vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka.

Dolazak odbijenih valova do mjesta zavješenja izolatora, odnosno do vrha stupa ovisi o vremenu putovanja po stupu. Kako je vrijeme putovanja vala po stupu u vezi s visinom stupa, to zaključujemo da visina stupa utječe na vjerojatnost nastanka povratnog preskoka. Lako je zaključiti da niži stupovi imaju manju vjerojatnost nastanka povratnog preskoka (odbijeni valovi prije dolaze do vrha i prije utječu na smanjenje napona).

Utjecaj uzemljenja stupa dalekovoda na povratni napon preskoka

Istraživanje ponašanja uzemljivača dalekovodnih stupova pri strujama munje iznimno je složeni zadatak. U igri je čitav niz pojava. Nabrojimo samo neke pojave koje bitno određuju ponašanje:

- Munja je visokofrekventna pojava, te zbog povećane frekvencije dolazi do povećanja induktivnog otpora. Pored toga, visoka frekvencija struje groma dovodi do

tzv. »frekventno ovisnih« električnih parametara uzemljivača (porast djelatnog otpora, promjena vlastitih i međusobnih induktiviteta). Taj skup pojava dovodi do rasta impedancije uzemljenja s porastom frekvencije.

- U okolini uzemljivača (posebno u slučaju visoke specifične otpornosti tla) dolazi do jakih električnih polja, što će dovesti do parcijalnog izbijanja u okolini uzemljivača. Parcijalno izbijanje (parcijalni električni lukovi) doprinosi povećanju efektivnog promjera dijelova uzemljivača, tj. smanjenju impedancije uzemljenja.
- S obzirom na visoku frekvenciju struje munje, uzemljivač se stupa ne može promatrati kao koncentrirani element, te je za točno formuliranje problema potrebno uzeti u obzir i valni proces na samom uzemljivaču. Identifikacija modela koji vjerno odslikava naprijed navedene pojave vrlo je složen zadatak. U svijetu (a manjim dijelom i kod nas) izvršeno je mnogo istraživanja u cilju pronalaženja prikladnog modela.

Danas se pri proračunavanju vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka upotrebljavaju sljedeće impedancije uzemljivača dalekovodnih stupova:

- konstantna impedancija
- vremenski promjenljiva impedancija
- strujno ovisna impedancija.

Proračun s pomoću konstantne impedancije najjednostavniji je. Vrijednost impedancije obično se određuje s pomoću eksperimentalno dobivenih krivulja. Drugi način proračuna s pomoću konstantne impedancije zasniva se na prethodnom određivanju impedancije uzemljivača na frekvenciji koja je povezana s visinom stupa (na osnovi vremena putovanja po stupu), uz eventualnu korekciju zbog nastanka parcijalnih pražnjenja (korekcija zbog parcijalnih praženjenja uzima se preko eksperimentalnih krivulja).

Vremenski promjenljiva impedancija uzima u obzir valni proces na uzemljivaču i može se odrediti računalnim modeliranjem. Taj model ne uzima u obzir parcijalna pražnjenja u okolini uzemljivača.

Strujno ovisna impedancija (impedancija opada sa strujom) obuhvaća prije svega doprinos parcijalnih pražnjenja u okolini uzemljivačkog stupa.

11.6.2. Napuci za projektiranje i održavanje uzemljenja stupova dalekovoda s aspekta povratnog napona preskoka

a) Mehanizam nastanka povratnog preskoka u dalekovodnom stupu izuzetno je složen problem. Ovisan je o velikom broju utjecajnih parametara. Evo nekoliko značajnijih utjecajnih veličina:

- impulsne karakteristike uzemljivača
- valni proces na dalekovodnom stupu

- atmosfersko praženjenje (kanal i struja groma)
- udar groma u dalekovodni stup (učestalost, raspodjela)
- mehanizam preskoka na izolatorskom lancu.

Zato smo danas u stanju analizirati nastanak povratnog preskoka samo uz izvjesna pojednostavnjenja. Utjecajni parametri atmosferskih pražnjenja, kao skup bitnih ulaznih parametara mogu se dobiti jedino dugotrajnim registriranjem na širokim područjima kojima se prostiru elektroenergetski sustavi i mjerenjima u ispitnim stanicama.

b) Kod proučavanja utjecaja povratnih preskoka na dalekovodima na rad elektroenergetskog sustava, nužno je analizirati sve pojave s kojima su povezani (prenaponski valovi, zaštita od prenapona, sklopni prenaponi, stabilnost, sekundarni luk, djelovanje struje zemljospoja itd.).

c) Uzemljivač dalekovodnog stupa igra važnu ulogu pri definiranju vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka. Stacionarne karakteristike uzemljivača dobro su poznate. No, ponašanje uzemljivača dalekovodnih stupova pri odvođenju struje groma iznimno je složen problem. Zbog toga je u svijetu, a i kod nas izvršeno mnogo istraživanja. Istraživanja su se uglavnom izvodila u dva pravca:

- pronalaženje prikladnog modela
- eksperimentalna istraživanja.

Kada je to bilo moguće, uspoređeni su računalni i eksperimentalni rezultati. Na osnovi tih uspoređenja može se verificirati računalni model i na taj način prijeći na računalno modeliranje, čime se postiže važna racionalizacija (eksperimentalna istraživanja su dugotrajna i skupa).

d) Kod odvođenja struje groma uzemljivačem dalekovodnog stupa potrebno je uočiti dvije pojave:

- porast impedancije uzemljenja zbog induktiviteta i frekventno ovisnih parametara uzemljivača
- smanjenje impedancije uzemljenja ako u okolini uzemljivača dolazi do električnih pražnjenja.

Prva se pojava danas može analizirati raspoloživim matematičkim aparatom, ali treba imati u vidu da se analiza iznimno usložnjava ako se žele uzeti u obzir svi utjecajni parametri (problem je trodimenzionalan, nehomogenost zemljišta teško se modelira i sl.). Druga se pojava može opisati preko promjene vodljivosti u okolini uzemljivača, ali je za to potrebno definirati kriterije (probojni napon zemlje, debljine zone u kojima dolazi do pražnjenja i sl.).
Jasno je da je razvoj jedinstvenog modela koji obuhvaća obje pojave vrlo složeni zadatak.

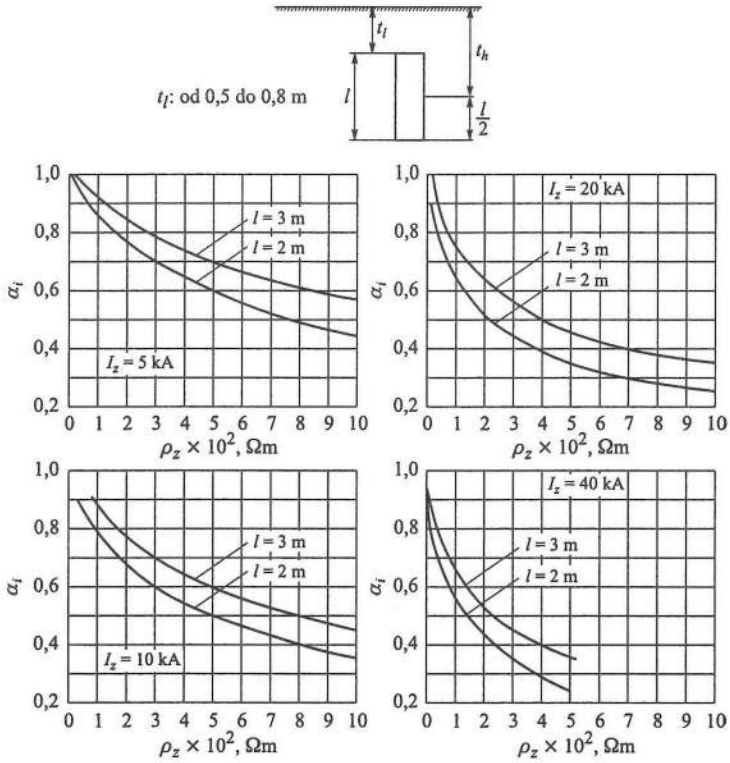
e) Znatna racionalizacija ugradnje uzemljivača dalekovodnih stupova mogla bi se napraviti ako bi se odredio prihvatljiv broj povratnih preskoka na 100 km dalekovoda tijekom jedne godine.

11.7. PRORAČUN IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA ZA RAZLIČITE VRSTE UZEMLJIVAČA

Za približne izračune impulsnog otpora uzemljenja R_i uputno je koristiti se dijagramom $\alpha_i = f(\rho_z)$ za određenu duljinu uzemljivača l i struje munje kroz uzemljivač I_z. Pri tim izračunima zanemaruje se utjecaj trajanja čela vala $T_č$ i umjesto impulsne impedancije uzemljenja (po formuli (11.4–1)) računa se impulsni otpor uzemljenja, dakle $Z_i \approx R_i$. Vrijednost impulsnog otpora uzemljenja R_i računa se tako da se iz niže navedenih dijagrama očita impulsni koeficijent α_i te pomnoži s otporom uzemljenja (izračunanim po poznatim formulama), dakle $R_i = \alpha R_z$.

11.7.1. Proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za štapne uzemljivače

Uporabom dijagrama na slici 11.7–1 očita se impulsni koeficijent uzemljenja α_i, zatim se izračuna otpor uzemljenja R_z po formulama iz odsječka 5.1. i konačno impulsni otpor uzemljenja $R_i = \alpha_i R_z$.



Sl. 11.7.–1. Impulsni koeficijenti uzemljenja α_i u ovisnosti o otpornosti tla ρ_z, parametar je duljina štapnog uzemljivača l i struja munje kroz uzemljivač I_z.

Primjer 11C

Izračunajte impulsni otpor uzemljenja štapnog uzemljivača duljine $l = 2$ i 3 m promjera $d = 0{,}06$ m ukopanog u dubinu $t = 0{,}5$ (od površine tla do gornjeg ruba uzemljivača) u tlo otpornosti $\rho_z = 100$ i 400 Ωm korištenjem dijagrama na slici 11.7–1 za $I_z = 5$, 10, 20 i 40 kA.

Otpor uzemljenja računa se po formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{4t_h + l}{4t_h - l}\right)\right] \qquad (11.5\text{–}1)$$

$$R_i = \alpha_i \cdot R_z$$

gdje je:

$$t_h = t + \frac{l}{2}$$

t dubina ukopa uzemljivača, mjerena od gornjeg ruba do površine tla, m.

Rezultati proračuna dani su u tablici 11.7–1.

Tablica 11.7–1. Izračun otpora uzemljenja R_z, impulsnog otpora uzemljenja R_i i koeficijenta uzemljenja α_i za podatke iz primjera 11C.

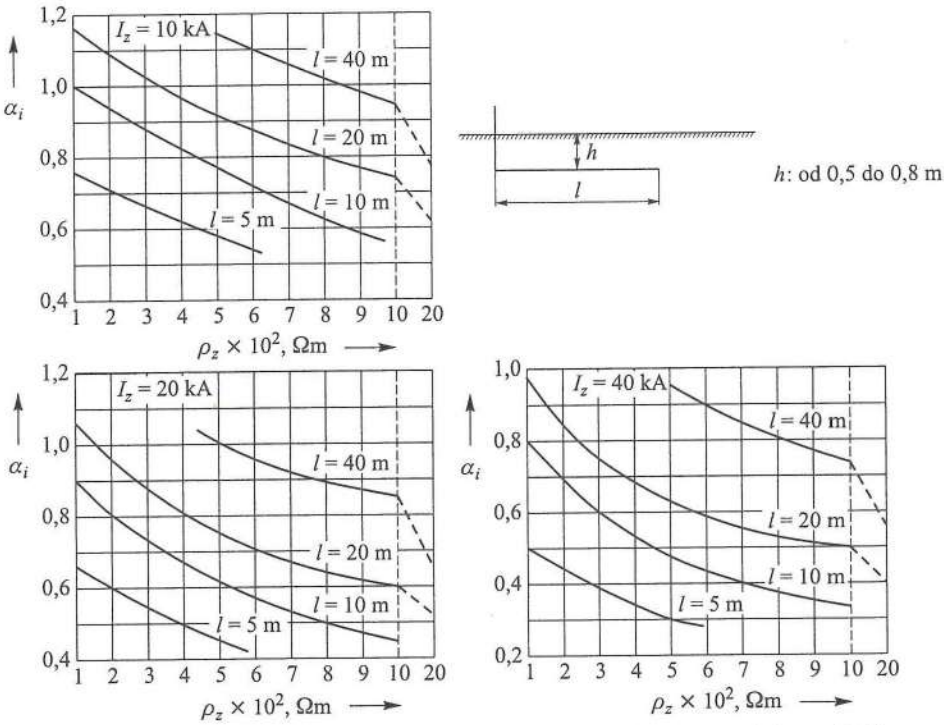
Duljina l, m	Dubina ukopa t, m	Dubina $t_h = t + l/2$, m	Promjer d, m	I_z, kA	ρ_z, Ωm	R_z, Ω	α_i	R_i, Ω
2	0,5	1,5	0,06	5	100	36,178	0,85	30,751
3	0,5	2	0,06	5	100	26,523	0,92	24,400
2	0,5	1,5	0,06	10	100	36,178	0,78	28,219
3	0,5	2	0,06	10	100	26,523	0,86	22,810
2	0,5	1,5	0,06	20	100	36,178	0,64	23,154
3	0,5	2	0,06	20	100	26,523	0,74	19,627
2	0,5	1,5	0,06	40	100	36,178	0,56	20,260
3	0,5	2	0,06	40	100	26,523	0,66	17,505
2	0,5	1,5	0,06	5	400	144,713	0,65	94,063
3	0,5	2	0,06	5	400	106,092	0,74	78,508
2	0,5	1,5	0,06	10	400	144,713	0,54	78,145
3	0,5	2	0,06	10	400	106,092	0,66	70,021
2	0,5	1,5	0,06	20	400	144,713	0,395	57,162
3	0,5	2	0,06	20	400	106,092	0,51	54,107
2	0,5	1,5	0,06	40	400	144,713	0,29	41,967
3	0,5	2	0,06	40	400	106,092	0,40	42,437

Iz tablice 11.7–1 vidimo da je povoljniji (manji) impulsni otpor uzemljenja R_i pri većim strujama munje (recimo za $I_z = 40$ kA u odnosu na $I_z = 5$ kA) i također za veću otpornost tla, npr. za $\rho_z = 400$ u odnosu na $\rho_z = 100$ Ωm. Prema tehničkim propisima o gromobranima (točka 4.614) [6] za štapni uzemljivač s međusobnim razmakom uzemljivača većim od 5 m uzima se da je $R_z = R_i$.

11.7.2. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i trakastog uzemljivača uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i

Na slici 11.7–2 dani su impulsni koeficijenti $\alpha_i = f(\rho_z)$ za duljine trakastih uzemljivača $l = 5$, 10, 20 i 40 m, te za struje groma $I_z = 10$, 20 i 40 kA pri dubini ukopa trakastog uzemljivača $h = 0{,}5 \ldots 0{,}8$ m. I ovdje se impulsni otpor uzemljenja R_i izračuna tako da se po poznatim formulama izračuna otpor uzemljenja R_z i zatim pomnoži s impulsnim faktorom α_i, dakle $R_i = \alpha_i \cdot R_z$.

To je približni proračun umjesto točnijeg proračuna impulsne impedancije uzemljenja Z_i po formuli (11.4–14).



Sl. 11.7–2. Impulsni koeficijenti uzemljenja α_i u ovisnosti o otpornosti tla ρ_z, duljine trakastog uzemljivača l i struja munje kroz uzemljivač I_z.

Primjer 11D

Izračunajte približni impulsni otpor uzemljenja R_i uporabom dijagrama na slici 11.7–2 za trakasti uzemljivač sljedećih podataka: $l = 10$, 20 i 40 m, $\rho_z = 100$, 200 i 400 Ωm, $I_z = 10$, 20 i 40 kA, materijal je željezna pocinčana traka dimenzija 25 mm × 4 mm i $d = 0{,}0125$ m za dubinu ukopa $h = 0{,}8$ m.

Rezultati proračuna dani su u tablici 11.7–2. Otpor uzemljenja R_z izračunan je po formuli:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{h \cdot d}$$

$$R_i = \alpha_i \cdot R_z$$

Tablica 11.7–2. Izračun otpora uzemljenja R_z, impulsnog otpora uzemljenja R_i, i impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i za podatke iz primjera 11D.

Duljina l, m	Dubina ukopa h, m	Promjer uzemljivača d, m	I_z, kA	ρ_z, Ωm	R_z, Ω	α_i	R_i, Ω
10	0,8	0,0125	10	100	14,659	1,00	14,659
10	0,8	0,0125	10	200	29,318	0,94	27,559
10	0,8	0,0125	10	400	58,636	0,82	48,081
20	0,8	0,0125	10	100	8,432	1,16	9,781
20	0,8	0,0125	10	200	16,864	1,09	18,382
20	0,8	0,0125	10	400	33,758	0,97	32,716
40	0,8	0,0125	10	100	4,768	1,30	6,198 *
40	0,8	0,0125	10	200	9,536	1,26	12,015 *
40	0,8	0,0125	10	400	19,072	1,14	21,742
10	0,8	0,0125	20	100	14,659	0,90	13,193
10	0,8	0,0125	20	200	29,318	0,81	23,748
10	0,8	0,0125	20	400	58,636	0,67	39,286
20	0,8	0,0125	20	100	8,432	1,06	8,938
20	0,8	0,0125	20	200	16,864	0,96	16,189
20	0,8	0,0125	20	400	33,728	0,80	26,982
40	0,8	0,0125	20	100	4,768	1,25	5,960 *
40	0,8	0,0125	20	200	9,536	1,22	11,339 *
40	0,8	0,0125	20	400	19,072	1,06	20,216
10	0,8	0,0125	40	100	14,659	0,80	11,727
10	0,8	0,0125	40	200	29,318	0,70	20,523
10	0,8	0,0125	40	400	58,636	0,54	31,663
20	0,8	0,0125	40	100	8,432	0,98	8,263
20	0,8	0,0125	40	200	16,864	0,84	14,166
20	0,8	0,0125	40	400	33,728	0,69	23,272 *
40	0,8	0,0125	40	100	4,768	1,11	5,292 *
40	0,8	0,0125	40	200	9,536	1,09	10,394
40	0,8	0,0125	40	400	19,072	1,00	19,072

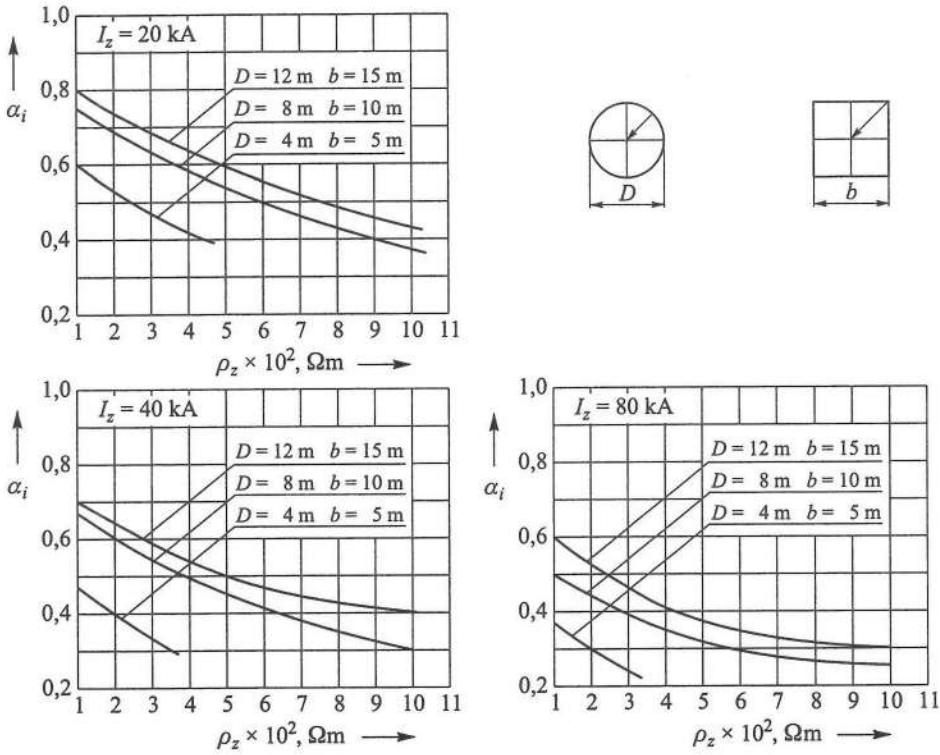
* Aproksimirane su krivulje $\alpha_i = f(\rho_z)$

Iz tablica 11.7–2 vidimo da se impulsni koeficijent uzemljenja α_i i impulsni otpor uzemljenja povećava pri duljini trakastog uzemljivača većoj od 20 m pri manjoj struji munje, recimo I_z = 10 kA i manjoj otpornosti tla, npr. ρ_z = 100 Ωm. S povećanjem otpornosti tla za sve duljine trakastog uzemljivača i struje munje smanjuje se impulsni koefi-

cijent α_i i impulsni otpor uzemljenja R_i. To je sukladno *Tehničkim propisima o gromobranima točka*, 4.613 u prikazanoj tablici.

Duljina trakastog uzemljivača l, m	Otpornost tla ρ_z, Ωm				
	50	100	150	200	250 i više
do 20	2,0	1,0	–	–	–
$20 < l \leq 30$	3,0	1,5	1,0	–	–
$30 < l \leq 40$	4,0	2,0	1,3	1,0	–
$40 < l \leq 50$	5,0	2,5	1,7	1,3	1,0

11.7.3. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za prstenasti i kvadratni uzemljivač uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i



Sl. 11.7–3. Impulsni koeficijent uzemljenja α_i za prstenasti i kvadratni uzamljivač u ovisnosti o otpornosti tla, parametri su promjer prstena D, duljina stranice b i struja munje kroz uzemljivač I_z.

Prema literaturi [26] impulsni otpor uzemljenja R_i za prstenasti ili kvadratni uzemljivač može se približno izračunati uporabom dijagrama na slici 11.7–3 za impulsni koeficijent uzemljenja α_i i izračunom otpora uzemljenja R_z za prstenasti uzemljivač:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{4\pi D^2}{h \cdot d} \tag{11.7–1}$$

odnosno za kvadratni uzemljivač stranice b:

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi^2 D_{ek}} \cdot \ln \frac{4\pi D_{ek}^2}{hd}$$

$$D_{ek} = \frac{b^2}{\sqrt{\pi}} \tag{11.7–2}$$

D_{ek} je ekvivalentni promjer kvadratnog uzemljivača.
Izračunani R_z uvrsti se u formulu $R_i = \alpha_i \times R_z$.

11.7.4. Približni proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i različitih uzemljivača uporabom koeficijenta iskorištenja uzemljivača η_u i impulsnog koeficijenta uzemljivača α_i

Kod proračuna impulsnog otpora uzemljenja dolazi do uzajamnog utjecaja dvaju susjednih uzemljivača te dolazi do povećanja ukupnog otpora uzemljenja i potrebno je izračunati ukupni otpor impulsnog uzemljivača, podijeliti ga s koeficijentom iskorištenja impulsnog uzemljivača $\eta_u < 1$ iz tablice 11.7–3, te ukupni impulsni otpor uzemljenja za pojedine konfiguracije uzemljivača prema tablici 11.7–4 izračunati prema formuli:

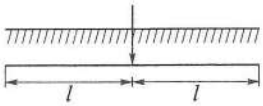
$$R_{i\Sigma} = \frac{1}{\eta_u \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}} \tag{11.7–3}$$

Za paralelni spoj n_1 (broj) uzemljivača jednog tipa impulsnog otpora uzemljenja R_{i1}, i n_2 (broj) uzemljivača drugog tipa impulsnog otpora R_{i2}, ukupni impulsni otpor uzemljenja iznosi:

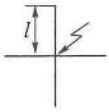
$$R_{i\Sigma} = \frac{n_1 R_{i1} \cdot n_2 R_{i2}}{(n_1 R_{i1} + n_2 R_{i2})\eta_u} \tag{11.7–4}$$

Tablica 11.7–3. Koeficijent iskorištenja impulsnog uzemljivača η_u pri protjecanju struje munje za različite vrste izmjenjivača prema [26].

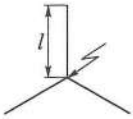
Trakasti uzemljivač



$\eta_u = 1$

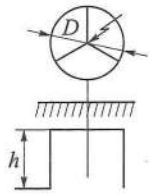


l, m	10	20	30	40
η_u	0,75	0,8	0,85	0,9



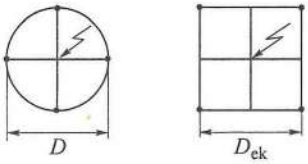
l, m	10	20	30	40
η_u	0,65	0,7	0,75	0,8

Trakasti sa štapnim uzemljivačima



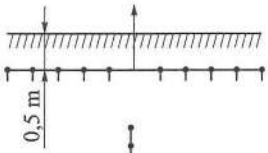
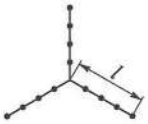
$\eta_u = f(D/h)$

D/h	3,5	5
η_u	0,7	0,75



$\eta_u = f(D_{ek}/h)$

D_{ek}/h	3	4,5
η_u	0,7	0,75

Trakasti sa štapnim uzemljivačima	Broj krakova	Duljina kraka l, m	Broj štapova uzemljivača u jednom kraku	η_u
	2	10	3	0,90
		20	5	0,90
		30	7	0,85
		40	10	0,85
	3	10	3	0,65
		20	5	0,75
		30	7	0,80
		40	10	0,80
	4	10	3	0,55
		20	5	0,65
		30	7	0,70
		40	10	0,70

Impulsni koeficijent α_i uzemljivača za trakaste uzemljivače pri frekvenciji 3...6 MHz prema [23] za različite duljine uzemljivača i otpornost tla i amplitude struje munje naveden je u tablici 11.7–4.

Isto za štapne uzemljivače za duljinu od 2...3 m pri frekvenciji od 36 MHz podaci su navedeni u tablici 11.7–5.

Podaci impulsnog koeficijenta uzemljivača α_i za prstenaste uzemljivače navedeni su u tablici 11.7–6 a za armiranobetonski temelj u tablici 11.7–7 i za zrakasti trakasti uzemljivač u tablici 11.7–8.

Tablica 11.7–4. Impulsni koeficijent uzemljivača α_i za trakasti vodoravni uzemljivač pri frekvenciji 3...6 MHz [23].

Otpornost tla ρ_z, Ωm	Duljina uzemljivača l, m	Impulsni koeficijent α_i pri amplitudi struje, kA			
		5	10	20	40
100	5	0,80	0,75	0,65	0,50
	10	1,05	1,00	0,90	0,80
	20	1,20	1,15	1,05	0,95
500	5	0,60	0,55	0,45	0,30
	10	0,80	0,75	0,60	0,45
	20	0,95	0,90	0,75	0,60
	30	1,05	1,00	0,90	0,80
1000	10	0,60	0,55	0,45	0,35
	20	0,80	0,75	0,60	0,50
	40	1,00	0,95	0,85	0,75
	60	1,20	1,15	1,10	0,95
2000	20	0,65	0,60	0,50	0,40
	40	0,80	0,75	0,65	0,55
	60	0,95	0,90	0,80	0,75
	80	1,10	1,05	0,95	0,90
	100	1,25	1,20	1,10	1,05

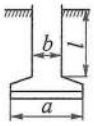
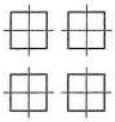
Tablica 11.7–5. Impulsni koeficijent α_i za štapni uzemljivač duljine 2...3 m pri frekvenciji 36 MHz [23].

Otpornost tla ρ_z, Ωm	Impulsni koeficijent α_i pri amplitudi struje, kA			
	5	10	20	40
100	0,90	0,85	0,75	0,60
500	0,70	0,60	0,45	0,30
1000	0,55	0,45	0,30	–

Tablica 11.7–6. Impulsni koeficijent uzemljivača α_i za prstenasti uzemljivač [23].

Otpornost tla ρ_z, Ωm	Promjer kruga D_1, m	Impulsni koeficijent α_i pri amplitudi struje, kA		
		20	40	80
100	4	0,60	0,45	0,35
	8	0,75	0,65	0,50
	12	0,80	0,70	0,60
500	8	0,55	0,45	0,30
	12	0,60	0,50	0,35
1000	8	0,40	0,30	0,25
	12	0,45	0,40	0,30

Tablica 11.7–7. Impulsni koeficijent uzemljivača α_i u armiranobetonskom temelju za otpornost $\rho_z < 300$ Ωm [23].

Tip temelja		Impulsni koeficijent uzemljenja α_i pri amplitudi struje, kA		
		5	10	20
	$R_{z,pl} = \frac{1{,}75\rho_z}{2D_{ek}}$ $R_{z,ST} = \frac{1{,}75\rho_z}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d}$	1	1	1
 $n = 4$	$R_{z\Sigma} = \frac{R_{z,pl}\cdot R_{z,ST}}{R_{z,pl}+R_{z,ST}}\cdot\frac{1}{0{,}9}$ $R_{i\Sigma} = \frac{R_{z\Sigma}}{n\alpha_i}$	0,9* 0,7**	0,6 0,5	0,3 0,3

* za betonsku ploču
** za betonske stupove

Tablica 11.7–8. Impulsni koeficijent uzemljenja α_i za zrakasti trakasti uzemljivač pri frekvenciji 3,5 MHz za različite struje I_z, otpornost tla ρ_z, duljinu i broj krakova zrakastog uzemljivača [23].

Broj krakova trakastog uzemljivača	Duljina kraka l, m	Amplitudna struja I_z, kA	Impulsni koeficijent α_i pri otpornosti tla ρ_z, Ωm			
			100	500	1000	1500
2	10	10	1,08	0,84	0,67	0,60
		25	0,85	0,74	0,57	0,49
		50	0,90	0,60	0,44	0,38
2	20	10	1,20	0,95	0,76	0,65
		25	1,10	0,86	0,68	0,57
		50	1,00	0,73	0,54	0,45

Tablica 11.7–8. – nastavak

Broj krakova trakastog uzemljivača	Duljina kraka l, m	Amplitudna struja I_z, kA	Impulsni koeficijent α_i pri otpornosti tla ρ_z, Ωm			
			100	500	1000	1500
		10	1,30	1,05	0,85	0,73
2	30	25	1,21	0,97	0,77	0,65
		50	1,13	0,84	0,65	0,54
		10	1,11	0,87	0,70	0,61
3	10	25	1,02	0,77	0,69	0,52
		50	0,92	0,65	0,58	0,41
		10	1,24	1,00	0,79	0,69
3	20	25	1,14	0,89	0,70	0,62
		50	1,03	0,78	0,60	0,52
		10	1,33	1,10	0,93	0,81
3	30	25	1,23	1,00	0,83	0,72
		50	1,14	0,91	0,74	0,63
		10	1,16	0,90	0,73	0,65
4	10	25	1,08	0,83	0,64	0,55
		50	0,98	0,70	0,53	0,45
		10	1,28	1,04	0,84	0,74
4	20	25	1,19	0,95	0,75	0,66
		50	1,07	0,83	0,66	0,57
		10	1,37	1,14	0,85	0,85
4	30	25	1,28	1,04	0,87	0,76
		50	1,17	0,95	0,79	0,69

Tablica 11.7–9. Impulsni koeficijent uzemljenja α_i za grupu štapnih uzemljivača za različite duljine uzemljivača l i razmake a pri frekvenciji od 3,5 MHz, za otpornost tla ρ_z [23].

Broj uzemljivača	Razmak uzemljivača a, m	I_z, kA	$l = 2{,}5$ m				$l = 5$ m				$l = 10$ m			
			ρ_z, Ωm				ρ_z, Ωm				ρ_z, Ωm			
			100	500	1000	1500	100	500	1000	1500	100	500	1000	1500
		10	1,17	0,90	0,70	0,60	1,25	0,95	0,75	0,66	1,41	1,14	0,91	0,81
2	10	25	1,06	0,80	0,60	0,51	1,14	0,87	0,67	0,57	1,32	1,05	0,83	0,73
		50	0,97	0,69	0,49	0,42	1,04	0,77	0,55	0,47	1,22	0,95	0,73	0,62
		10	1,20	0,95	0,75	0,65	1,27	1,05	0,84	0,72	1,43	1,19	0,97	0,86
3	20	25	1,11	0,85	0,66	0,56	1,18	0,95	0,75	0,65	1,36	1,11	0,91	0,79
		50	1,02	0,75	0,56	0,47	1,08	0,85	0,65	0,56	1,27	1,03	0,81	0,70
		10	1,28	1,00	0,78	0,70	1,35	1,13	0,95	0,80	1,49	1,25	1,03	0,93
4	30	25	1,19	0,90	0,70	0,61	1,25	1,04	0,84	0,73	1,40	1,17	0,94	0,86
		50	1,00	0,81	0,62	0,54	1,18	0,94	0,74	0,64	1,32	1,08	0,86	0,78
		10	1,30	1,06	0,84	0,70	1,40	1,15	0,94	0,78	1,52	1,27	1,05	0,93
2	10	25	1,22	0,98	0,76	0,61	1,30	1,07	0,86	0,70	1,42	1,18	0,97	0,85
		50	1,12	0,87	0,66	0,51	1,21	0,98	0,75	0,60	1,32	1,08	0,87	0,75

Tablica 11.7–9. – nastavak

Broj uzemljivača	Razmak uzemljivača a, m	I_z, kA	$l = 2{,}5$ m				$l = 5$ m				$l = 10$ m			
			ρ_z, Ωm				ρ_z, Ωm				ρ_z, Ωm			
			100	500	1000	1500	100	500	1000	1500	100	500	1000	1500
3	20	10	1,35	1,09	0,87	0,75	1,42	1,18	0,96	0,84	1,50	1,29	1,08	0,97
		25	1,25	1,01	0,80	0,69	1,34	1,10	0,89	0,76	1,42	1,20	1,00	0,89
		50	1,17	1,05	0,73	0,61	1,26	1,01	0,79	0,68	1,34	1,11	0,80	0,80
4	30	10	1,37	1,10	0,89	0,80	1,46	1,20	0,98	0,88	1,58	1,35	1,12	0,101
		25	1,29	1,02	0,82	0,74	1,38	1,13	0,91	0,81	1,48	1,25	1,04	0,93
		50	1,21	0,95	0,76	0,67	1,30	1,03	0,83	0,74	1,40	1,16	0,94	0,85
2	10	10	1,35	1,13	0,92	0,78	1,47	1,23	1,01	0,87	1,59	1,34	1,10	0,100
		25	1,26	1,05	0,84	0,69	1,39	1,14	0,91	0,76	1,51	1,27	1,03	0,92
		50	1,17	0,95	0,74	0,60	1,25	1,03	0,82	0,67	1,43	1,18	0,95	0,83
3	20	10	1,41	1,20	1,00	0,87	1,52	1,27	1,06	0,93	1,64	1,43	1,22	1,10
		25	1,32	1,12	0,92	0,80	1,41	1,20	0,97	0,85	1,55	1,34	1,13	0,101
		50	1,23	1,01	0,83	0,72	1,33	1,10	0,88	0,76	1,47	1,24	1,03	0,92
4	30	10	1,49	1,26	1,05	0,95	1,62	1,32	1,10	0,98	1,70	1,51	1,28	1,16
		25	1,40	1,18	0,99	0,87	1,52	1,25	1,03	0,90	1,63	1,42	1,19	1,08
		50	1,31	1,08	0,90	0,80	1,41	1,15	0,94	0,83	1,54	1,31	1,10	0,101

Literatura – za točku 11.5

[L1] Haznadar, Z.: *Teoretska elektrotehnika, Teorija polja*, Liber, Zagreb, 1976.

[L2] Gupta, B. R., Thopar, R.: *Impulse impedances of grounding grids*, IEE Trans. PAS, VOL. PAS – 99, pp. 2357–2362 No 6., Nov/sec. 1988.

[L3] Grčev, L.: *Proračun tranzijentne impedancije uzemljivačkih sistema, doktorska disertacija u izradi*, ETF Zagreb, 1985.

[L4] Harrington, R. R.: *Field Computation by Moment Methods*, The Macmillan Company, New York, 1968.

[L11] Brigham, E. O.: *The Test Fourrier Transform*, Prentice–Hall Inc., Englewood Clifs, New Jersey, 1974.

[L12] Koch, W.: *Erdungen in Weschelstromanlagen uber 1 kV 2. aufl.*, Julius Springer, Göttingen, Heidelberg, Berlin, 1955.

[L13] Umar, M. A.: *Lightning*, McGraw-Hill Book Company, New York 1969.

Literatura – za točke 11.2, 11.3 i 11.6

[L1] Rohsler, H., Strand, A.: *Requirements for Earthing System with Respect to Backflash Frequency*, Ref 33–10, CIGRE, Paris, 1988.

[L2] Diesendorf, W.: *Insulation Coordination in High Voltage Electric Power Systems*, Butterwarts, London, 1974.

[L3] IEE Working Group: *A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines*, IEE, PAS 1084, Summer Meeting, Seattle, Washington, July 16–20, 1984.

[L4] Dommel, H. W.: *Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Network*, IEE Trans on PAS, Vol. 88, pp 388–399, 1969.

[L5] Darveniza, M. i drugi: *Modelling for Lightning Performance Calculations*, IEE Trans on PAS, Vol. 98, pp 1900–1908, 1979.

[L6] Villefranque, V.: *Mozens D'Essais Pour L'etude Des Prises De Terre*, Electricite De France, Department Transport Appareillage, Division »Lignes Aeriennes«, 18. Januar, 1979.

[L7] Kouteznikoff, P.: *Response Impulsionnelle des Prises de Terre aux Courants de Foudre*, CIGRE Symposium 22–81, Stockholm, 1991.

[L8] Eldon, J. Rogers: *Impedance Characteristics of Large Tower Footings to a 100 ms Wide Square Ware of Current*, IEE Trans on PAS, Vol. 100, No 1, January, 1981.

[L10] Liew, A. C., Darweniza, M.: *Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths*, Proc. IEE, Vol. 121, No 2, February 1974.

[L11] Gupta, B. R., Thapar, B.: *Impulse Impedance of Grounding Systems*, IEE PES Summer Meeting, Paper A–78–563–9, L. A. California.

[L12] Bewley, L. V.: *Traveling Waves on Transmission Systems*, John Willey

[L13] Bellaschi, P. L., Armington, R. E.: *Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds – III, Effect of Lead in Ground Installation*, AIEE Trans, Vol 62, pp. 334–335, 1943.

[L14] Rudenberg, Reinhold: *Electric Shock Waves in Power Systems*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 273–277, 1968.

[L15] Verma, R., Mukhedkar, D.: *Impulse Impedance of Buried Ground Wire*, IEE Trans on PAS, Vol. 99, No 5, Sept/Oct 1980.

[L16] Velatquez, R., Mukhedekar, D.: *Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behaviour*, IEE Trans on PAS, Vol. 103, No 6, June 1984.

[L17] Papalexopoulos, A. D., Meliopoulos, A. P.: *Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems*, IEE Trans on PAS, Vol. PRD-2, No 4, October 1987.

[L18] Veledar, M., Timić, Ž., Skok, S., Firšt, Z.: *Improvement of Grounding Properties by Using Bentonite*, CIGRE, Paris, 1982.

[L19] Veledar, M., Dilberović, N., Ljevak, M., Nuić, S., Smaka, A.: *Impulsni otpor uzemljenja stubova*, Elaborat IRCE Energoinvest 1671/85, Sarajevo 1985.

[L20] Dilberović, N., Veledar, M., Božanović, A.: *Uzemljivači dalekovoda u raznim uslovima vodljivosti tla*, Drugo jugoslovensko savjetovanje – Savremena problematika uzemljenja, Split, 1986.

[L21] Žutobradić, S.: *Proračun impulsnih karakteristika složenih uzemljivačkih sistema*, Elektrotehnika ELTHB2 29, 1986.

[L22] Grčev, L.: *Nov pristup numeričkom modeliranju impulsnih karakteristika uzemljivačkih sistema*, Elektrotehnika ELTHBŽ 29, 1986.

[L23] Grčev, L., Haznadar, Z.: *Numerical Modelling of Grounding Systems Transient Behaviour*, PPPR 87, Zagreb, 1987.

[L24] Grčev, L., Haznadar, Z.: *A Novel Technique of Numerical Modelling of Impulse Current Distribution in Grounding Systems*, 19th International Conference on Lightning Protection ICLP88, Graz, Austria, April 1988.

[L25] Đurđević, V., Petković, D., Huml/Dimitrijević, M.: *Sekundarni luk i ponovno brzo uključenje u mrežama visokih i vrlo visokih napona*, Energoinvest, Sarajevo, april 1985.

[L26] Sunde, E. D.: *Surge Characteristics of a Buried Bare Wire*, AIEE Trans, Vol. 59, pp 987–991, 1940.

[L27] Bewly, L. V.: *Theory and Tests of the Counterpoise*, Elec Engr, Vol. 53, pp 1163–1172, Aug. 1937.

[L28] EPRI: *Transmission Line Grounding*, EPRI EL-2699, Project 1494-1, Final Report, October 1982.

12. VODOVI ZA UZEMLJENJE, KRATKO SPAJANJE VODOVA I SABIRNICA VISOKOG I NISKOG NAPONA

12.1. VODOVI ZA UZEMLJENJE

Vodovi za uzemljenje i sabirni vodovi izvode se od pocinčanog željeza (najmanji presjek: 50 mm^2), bakra (najmanji presjek: 16 mm^2) i aluminija (najmanji presjek: 35 mm^2) koji se u novije vrijeme rjeđe upotrebljava. Presjek vodova za uzemljenje treba odabrati prema struji i vremenu trajanja zemljospoja tj. namještanju zemljospojne zaštite [L1].

Iznos struje zemnog spoja u mrežama s izoliranom nul-točkom ovisi o duljini spojnih vodova ili kabela sa sabirnicama transformatorske stanice. Iznos struje po kilometru zračnog voda može se približno odrediti iz sljedećih formula:

– jednostruki vod bez zemnog užeta

$$I_{zc} = \frac{U \cdot l}{450}, \quad \text{A} \tag{12.1–1}$$

– jednostruki vod sa zemnim užetom

$$I_{zc} = \frac{U \cdot l}{350}, \quad \text{A} \tag{12.1–2}$$

– dvostruki vod sa zemnim užetom

$$I_{zc} = \frac{U \cdot l}{400}, \quad \text{A} \tag{12.1–3}$$

gdje je:

I_{zc} kapacitivna struja zemljospoja za mrežu s izoliranom nul-točkom, A/km

U linijski napon, kV

l duljina zračne mreže koja je spojena na promatrane sabirnice, km.

Struja zemnog spoja za kabele navedena je u tablicama 12.1–1, 12.1–2 i 12.1–3. Sabirni vod uzemljenja dimenzionira se zbog sigurnosti na dvostruku struju zemnog spoja, dok je za ostale vodove mjerodavna struja zemnog spoja. U mrežama s uzemljenom nul-točkom presjek vodova uzemljenja treba odabrati prema struji jednopolnog kratkog spoja (zemljospoja).

Tablica 12.1–1. Kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} za kabelsku mrežu s izoliranom nul-točkom, pojasnih kabela, A/km.

Presjek, mm^2	Nazivni napon		
	6 kV	10 kV	20 kV
3 × 10	0,40	0,62	–
3 × 16	0,45	0,73	–
3 × 25	0,60	0,78	1,20
3 × 35	0,65	0,98	1,31
3 × 50	0,71	0,12	1,42
3 × 70	0,78	1,20	1,67
3 × 95	0,87	1,30	1,81
3 × 120	0,96	1,41	1,96
3 × 150	1,06	1,50	2,10
3 × 185	1,20	1,61	2,25
3 × 240	1,33	1,78	2,50
3 × 300	1,49	1,94	–

Tablica 12.1–2. Kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} za mrežu s izoliranom nul-točkom, H-kabel, A/km.

Presjek, mm^2	Napon		
	10 kV	20 kV	35 kV
3 × 16	1,63	–	–
3 × 25	1,88	2,18	–
3 × 35	2,08	2,45	3,10
3 × 50	2,40	2,83	3,60
3 × 70	2,77	3,27	4,00
3 × 95	2,97	3,50	4,23
3 × 120	3,27	3,80	4,65
3 × 150	3,54	4,10	5,00
3 × 185	3,87	4,50	5,40
3 × 240	4,32	4,95	5,94
3 × 300	4,70	5,55	6,54

Tablica 12.1–3. Kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} za jednožilni uljni kabel, A/km.

Presjek, mm^2	Napon	
	100 kV	220 kV
50	–	–
70	–	–
95	13,20	–
120	14,40	–
150	15,00	–
185	15,60	24,00
240	16,80	24,00
300	18,00	24,00
400	19,50	24,60
500	20,70	26,40

U tablici 12.1–4 navedena je dopuštena struja za pojedine presjeke. Navedeni su podaci o trajno dopuštenoj struji (za mreže s izoliranom nul-točkom i za mreže s uzemljenjem preko prigušnice) i o dopuštenoj struji trajanja 1 sekunde (za mreže s izravno uzemljenom nul-točkom). Dopuštena struja za drugo vrijeme trajanja određuje se na isti način kao i za sabirnice i strujne transformatore.

Tablica 12.1–4. Dopuštena struja trajnog opterećenja I_{tr} i struja kratkog spoja I_{k1} za vodove uzemljenja.

Presjek, mm^2	Trajno dopuštena struja I_{tr}, A			Dopuštena struja I_{k1}, 1 s, kA		
	Fe	Al	Cu	Fe	Al	Cu
16	–	–	150	–	–	2,5
25	–	160	200	–	2,5	4,0
35	–	200	250	–	3,5	5,5
50	100	250	350	3,0	5,0	8,0
70	175	–	–	4,5	7,0	11,5
100	200	–	–	6,0	10,0	16,0
200	300	–	–	12,5	20,0	32,5

Pri izvedbi zaštitnog uzemljenja treba voditi računa o sljedećem:

- Sve metalne dijelove koji u normalnom pogonu nisu pod naponom, ali mogu doći pod napon u slučaju kvara zbog izravnog dodira ili zbog preskoka luka, treba uzemljiti.
- Uređaje za upravljanje ne treba posebno uzemljiti, ako su s uzemljenim aparatom galvanski spojeni. Ako pak kao veza između ručnog uređaja za upravljanje i aparata služi lanac, uže, osovina ili sl., koji mogu doći u dodir s električnim lukom, potrebno ih je uzemljiti.

- Jednu od sekundarnih stezaljki dvopolno izoliranih naponskih transformatora treba uzemljiti. Treba voditi računa o tome da su u rasklopnom postrojenju na svim naponskim transformatorima uzemljene stezaljke koje odgovaraju istoj fazi, jer bi inače moglo doći do dvostrukoga zemnog spoja. U slogu jednopolno izoliranih naponskih transformatora dovoljno je uzemljiti nul-točku, ako naponski transformatori ne služe sinkronizaciji. Ako se međutim preko naponskih transformatora kontrolira sinkronizam, uzemljuje se jedna, na svim slogovima naponskih transformatora ista faza, na niskonaponskoj strani.
- Za uzemljenje aparata koji su smješteni na željeznoj konstrukciji ili željeznim stalcima može se upotrijebiti sama željezna konstrukcija ili stalak, ali samo ako su spojevi na konstrukciji zavareni ili spojeni vijcima tako da postoji dobra i sigurna galvanska veza.
- Armatura u željezno-betonskoj konstrukciji može poslužiti kao vod za uzemljenje ako armatura ima dovoljan presjek te ako je zavarivanjem ili vijcima osigurana dobra galvanska veza.
- Dijelovi koje treba uzemljiti moraju biti spojeni s uzemljivačem izravno ili preko sabirnog voda. Ne smiju se međutim dijelovi koje treba uzemljiti spajati u seriju.

12.2. NAPRAVE ZA KRATKO SPAJANJE I UZEMLJENJE VODOVA, SABIRNICA VISOKOG I NISKOG NAPONA

12.2.1. Propisi

Prema *Tehničkim propisima za elektroenergetska postrojenja iznad 1000 V* (N.N. 52/91) i *Pravilniku o zaštiti na radu pri korištenju električne energije* (N.N. 9/87) treba se pri radu na nadzemnim vodovima koristiti prijenosnim napravama, koje osiguravaju zaštitu ljudi od slučajnih ili atmosferskih prenapona. Mjesto rada treba s obje strane, na najmanjem (mogućem) razmaku, dobro kratko spojiti i uzemljiti. Za to se obično uzimaju motke za uzemljenje s bakrenom fleksibilnom užadi koja se spaja na uzemljenje postrojenja, odnosno na metalnu konstrukciju stupa ili njegova uzemljivača.

U mrežama s izravno uzemljenom nul-točkom transformatora, presjeci zemljovoda moraju odgovarati očekivanoj struji dozemnoga kratkog spoja (jednopolni kratki spoj). Kako zaštitni zemljovodi prijenosnih naprava za uzemljenje ujedno i kratko spajaju vodove ili sabirnice, treba ih provjeriti na najvećoj struji tropolnog kratkog spoja i provjeriti vrijeme namještanja zemljospojne zaštite.

U spomenutim tehničkim propisima definirana je granična temperatura vodiča od 150 °C za bakrene vodiče najveće dopuštene struje trajanja od 1 sekunde.

Zaštita elektroenergetskih postrojenja i vodova ima različita vremenska zatezanja prorade, pa vrijeme od 1 sekunde ne zadovoljava sve uvjete trajanja struje kratkog spoja. Vrijeme od 1 sekunde može se uzeti za slučaj uzemljenja vodiča daleko-

voda, jer je to približno vrijeme namještanja zaštite (u oba stupnja). U transformatorskim stanicama (sabirnice, spojni vodovi uređaja i opreme) uzima se vrijeme trajanja struje kratkog spoja približno 0,8 s, pa se tablica 12.2–1 u tom smislu treba ispraviti.

Tablica 12.2–1. Dopuštena struja kratkog spoja za vodove uzemljenja.

Presjek, mm^2	Dopuštena struja kratkog spoja I_{kmaks} trajanja 1 s, A i nazivna struja I_n (u zagradi), A		
	Fe	Al	Cu
16	–	–	2 500 (150)
25	–	–	4 000 (200)
35	–	3 700	5 500 (280)
50	3 300 (150)*	5 300 (250)*	8 000 (480)*
70	4 700 (180)*	7 400 (320)*	11 500 (590)*
100	6 700 (240)*	10 500 (430)*	16 000 (780)*
200	13 500 (420)*	21 000 (760)*	32 500 (1 380)*

* Vrijedi samo za trakaste uzemljivače.

Prema poznatom izrazu razvijena toplina je:

$$q = I_{kt}^2 Rt \tag{12.2–1}$$

Za trajanje kratkog spoja od 1 s, odnosno 0,8 s, razvijena toplina iznosi:

$$q = I_{k1}^2 \cdot R_1 \cdot 1, \quad q = I_{k0,8}^2 \cdot R_{0,8} \cdot 0{,}8 \tag{12.2–2}$$

Uvjetuje li se jednaka granična temperatura zagrijavanja od 150 °C i jednaki otpori $R_1 = R_{0,8}$, može se pretpostaviti da je razvijena toplina u oba slučaja jednaka.

$$q_1 = q_{0,8}$$

Slijedi:

$$I_{k1}^2 \cdot 1 = I_{k0,8}^2 0{,}8$$

$$I_{k0,8} = \sqrt{\frac{I_{k1}^2}{0{,}8}} = \frac{I_{k1}}{\sqrt{0{,}8}} \tag{12.2–3}$$

Za trajanje struje kratkog spoja od 0,8 s dopuštena struja kratkog spoja dana je u tablici 12.2–2 s obzirom na zagrijavanje vodiča do najviše temperature od 150 °C.

Danas se u srednjonaponskim mrežama koriste uglavnom jednožilni kabeli tipa XHE 49 ili XHP 48 koji imaju zaštitni vodič (ekran) od bakrenog vodiča presjeka od 16 do 35 mm^2. Dopuštena struja kratkog spoja zaštitnog vodiča izračuna se po formuli:

$$I_k = 0{,}22 \frac{S_z}{\sqrt{t}}, \quad \text{kA} \tag{12.2–3a}$$

gdje je:

S_z presjek zaštitnog vodiča, mm^2

t vrijeme trajanja kratkog spoja, s

I_{k1} dopuštena struja kratkog spoja u vremenu do 1 sekunde, kA

q razvijena toplina od struje kratkog spoja, Ws (J)

$R_1 = R_{0,8}$ djelatni otpori pri struji kratkog spoja u trajanju od 1 sekunde i trajanju od 0,8 sekunde, jednaki su jer se u tako kratkom vremenu ne mijenja temperatura

$q_1, q_{0,8}$ razvijena količina topline pri struji kratkog spoja u trajanju od 1 sekunde i 0,8 sekunde.

Tablica 12.2–2. Dopuštena struja kratkog spoja s obzirom na dopušteno zagrijavanje vodiča do temperature od 150 °C.

Presjek, mm^2	Dopuštena struja kratkog spoja I_{kmaks} trajanja 1 s, A		
	Čelik	Al	Cu
16	–	–	2 795
25	–	–	4 472
35	–	4 137	6 149
50	3 354	5 926	8 944
70	5 254	8 273	12 857
100	7 490	11 739	17 888
200	15 093	23 479	36 336

12.2.2. Proračun termičke struje kratkog spoja

Za dimenzioniranje vodiča zaštitnog zemljovoda potrebno je početne struje kratkog spoja proračunati na ekvivalentne struje zagrijavanja vodiča trajanja od 1 s, odnosno 0,8 sekunde.

Za točan proračun trebalo bi dosta podataka o mreži, generatorima, transformatorima i djelovanju zaštite. Ovdje se žele odabrati samo 2 do 3 presjeka vodiča zemljovoda, pa se mogu tolerirati pojednostavnjenja proračuna i približne vrijednosti (to više, što su presjeci vodiča tipizirani). Stoga će se od niza vrijednosti početnih struja odabrati četiri vrijednosti koje će biti temelj proračuna za:

a) sve vodove 110, 220 i 380 kV jedna – najveća vrijednost
b) transformatorske stanice 380/110 kV i 220/110 kV
c) transformatorske stanice 110/35 i 110/10 kV u blizini elektrane s većim strujama kratkog spoja
d) sve ostale stanice – udaljene od izvora i velikog konzumnog područja.

Odabrani kriteriji za vrijednosti početnih struja jednopolnoga kratkog spoja i vremena trajanja kratkog spoja za navedene su skupine sljedeći:

a) $I''_{KI} = 9{,}5$ kA $\quad t_K = 0{,}8$ s (distantna zaštita)
b) $I''_{KI1} = 30{,}5$ kA $\quad t_{K1} = 0{,}8$ s (distantna zaštita)
$I''_{KI2} = 8{,}5$ kA $\quad t_{K2} = 2{,}2$ s (nadstrujna zaštita)
c) $I''_{KI} = 20$ kA $\quad t_K = 0{,}8$ s (distantna zaštita)
d) $I''_{KI} = 10$ kA $\quad t_K = 0{,}8$ s (distantna zaštita)

Termičku struju kratkog spoja izračunamo po formuli (12.2–4) poznavajući efektivnu vrijednost početne struje kratkog spoja I''_k, faktore kratkog spoja m i n i vrijeme trajanja kratkog spoja t_k:

$$I_{\text{term}} = I''_k \sqrt{(m+n)} \cdot \sqrt{t_k} \tag{12.2–4}$$

gdje je:

I_{term} termička struja kratkog spoja, tj. efektivna vrijednost struje kratkog spoja koja bi za vrijeme trajanja kratkog spoja proizvela istu količinu topline kao i stvarna struja kratkog spoja, kA

I''_k efektivna vrijednost početne simetrične (izmjenične) struje kratkog spoja, kA

m faktor utjecaja istosmjerne komponente struje kratkog spoja

n faktor utjecaja izmjenične struje kratkog spoja

t_k vrijeme trajanja kratkog spoja, s.

Za određivanje veličine faktora m i n potrebno je poznavati i omjere

$$\frac{R}{X''_d}, \quad \frac{I''_K}{I'_K} \tag{12.2–5}$$

gdje je:

R djelatni otpor kratkospojnog strujnog kruga, Ω

X''_d početna, subtranzijentna reaktancija strujnog kruga, Ω

I'_K efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja, kA.

Tablica 12.2–3. Orijentacijske vrijednosti faktora m, n i omjera I''_k/I'_k za navedene skupine postrojenja.

Grupa postrojenja	R/X''_d	m	n	I''_k/I'_k	t_k, s
a (DV)	0,3	0,96	0,02	1,1	0,8
b_1 (TS), $t_k < 0{,}8$ s	0,03	0,86	0,15	1,25	0,8
c (TS)	0,05	0,86	0,08	1,25	0,8
d (TS)	0,05	0,86	0,08	1,25	0,8
b_2 (TS), $t_k < 2{,}2$		0,78	0,15		2,2

Omjer djelatnog otpora i početne reaktancije, te omjer početne i efektivne vrijednosti struje jednopolnoga kratkoga spoja određuje se iz poznatih tablica i izraza. Faktor m određen je istosmjernom komponentom struje kratkog spoja, a faktor n izmjeničnom komponentom struje kratkog spoja. Faktori m i n mogu se izračunati ili očitati iz dijagrama u [L1] ili iz nekoga drugog tehničkog priručnika, a za provjeru

vodiča za kratko spajanje i uzemljenje mogu se upotrijebiti orijentacijski podaci iz tablice 12.2–3.

Omjer I''_K/I'_K određuje se na temelju vrijednosti struje jednopolnog kratkog spoja i parametara prijelaznog stanja.

Tablica 12.2–4 u skladu je s *Pravilnikom o zaštiti na radu* pri korištenju električne energije (N.N. 9/87). Presjek je izračunat uporabom formule:

$$S = 5{,}07 I''_k \sqrt{t_k} \tag{12.2–6}$$

Tablica 12.2–4. Dopušteni presjek bakrenog užeta za uzemljenje i kratko spajanje u ovisnosti o struji kratkog spoja I''_k.

Presjek bakrenog užeta q, mm^2	Najveća struja tropolnog kratkog spoja I''_k, kA – trajanje kratkog spoja, s					
	10	5	2	1	0,5	0,2
16	1,0	1,4	2,2	3,2	4,4	7,0
25	1,5	2,2	3,5	5,1	6,8	11,0
35	2,2	3,1	4,8	7,0	9,6	15,4
50	3,1	4,3	7,0	10,0	14,0	22,0
70	4,3	6,0	9,5	14,0	19,5	30,8
95	5,8	8,3	13,0	18,5	26,5	41,9
120	7,5	10,5	16,5	23,5	33,5	52,9
150	9,2	13,0	21,0	29,5	42,0	66,1

12.2.3. Dimenzioniranje presjeka vodiča zemljovoda (prijenosne naprave za uzemljenje i kratko spajanje)

Iz prethodnih računa proizlazi da je trajna termička struja neznatno manja od početne struje kratkog spoja zbog malog prigušenja.

Usporedivši izračunane trajne termičke struje i propisima određene odnose presjeka vodiča i dopuštene termičke struje proizlazi da se za zemljovodne vodiče motki za uzemljenje trebaju upotrijebiti bakreni vodiči sljedećih presjeka:

a) 50 mm^2 Cu
b) 2 × 150 mm^2 Cu
c) 100 mm^2 Cu
d) 50 mm^2 Cu.

Neki inozemni propisi (njemački, francuski i dr.) dopuštaju veće zagrijavanje (200 °C), što smanjuje presjek zemljovoda. Uz pretpostavku istih struja i materijala vodiča sljedi:

$$\frac{S_{200\,°C}}{S_{150\,°C}} = \sqrt{\frac{150-65}{200-65}} = 0{,}79 \tag{12.2–7}$$

Iz formule (12.2–7) vidimo da je zbog većega dopuštenog zagrijavanja vodiča za uzemljenje i kratko spajanje dopušten manji presjek i to 79 % od prvotnog presjeka.

Ovdje se računa s temperaturom vodiča od 65 °C u trenutku nastanka kratkog spoja. Dopusti li se, dakle, najveće zagrijavanje od 200 °C, mogli bi se upotrijebiti vodiči sljedećih presjeka:

a) 50(35) mm^2 Cu
b) 2 × 120 mm^2 Cu
c) 100(70) mm^2 Cu
d) 50(35) mm^2 Cu

ili odgovarajuće kombinacije s već postojećim presjecima vodiča.

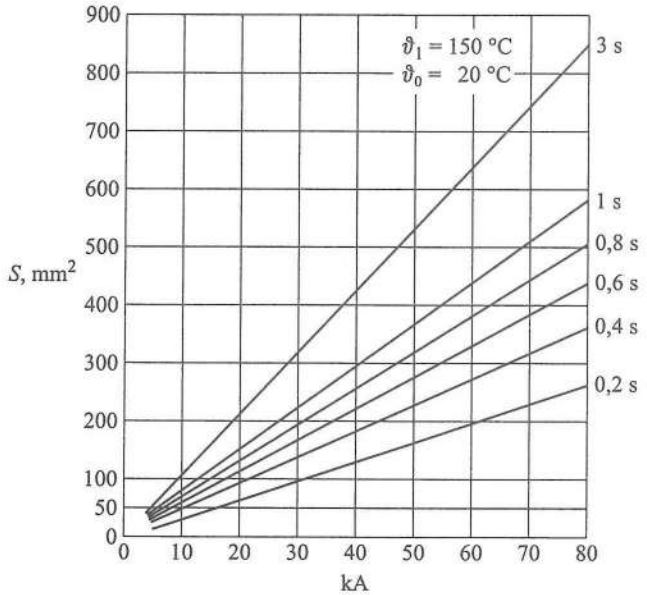
Nedostatak paralelnih vodiča veliko je opterećenje zbog dinamičkih sila stvorenih protjecanjem struje kratkog spoja, pa paralelne vodiče treba međusobno ukrutiti odgovarajućim čvrstim odstojnicima.

Osim dimenzioniranja vodiča treba kod motki za uzemljenje odabrati i odgovarajuće stezaljke, koje moraju propuštati struje kratkog spoja trajanja od 1 s sljedećih iznosa:

a) 10 kA/1 s
b) 30 kA/1 s
c) 25 kA/1 s
d) 10 kA/1 s

Za odabir presjeka zemljovoda od bakra preporuča se upotreba dijagrama na slici 12.2–4.

Dijagram je preuzet iz propisa VIDE 0141/11. 58 – Siemens – *Formeln und tabelen Buch*, i dopunjen pravcem za trajanje kratkog spoja od 3 s.



Sl. 12.2–4. Odabir presjeka zemljovoda od bakrenog užeta.

13. PROJEKTIRANJE I IZVOĐENJE UZEMLJIVAČA NA TRANSFORMATORSKIM STANICAMA 10(20)/0,4 kV I STUPOVIMA DALEKOVODA 10(20) kV

13.1. PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA

Projektiranje uzemljivača jedan je od onih problema s kojima je počela šira primjena računala u praksi projektiranja elektroenergetskih objekata.

Razlog je u činjenici što svaki pokušaj razvoja postupaka koji omogućuju izračun stvarne konfiguracije vodi k proračunu strujnog polja većeg broja aktivnih i pasivnih elemenata uzemljivača u homogenom ili vodoravno uslojenom tlu. Jasno je da se zbog toga uobičajen postupak ograničuje na jednostavnije geometrijske oblike.

Osnovna namjena razvijenih programa i mogućnosti računala obično određuju najveći broj, vrstu i prostorni raspored elemenata pri modeliranju uzemljivača. Najčešće su rješenja, a takva će se opisati u ovom poglavlju, ona u kojima se uzemljivač nadomješta pravocrtnim međusobno paralelnim ili okomitim elementima.

Posebna pozornost posvećena je razradi postupka optimizacije projektnog rješenja. Naime, ovdje se odstupalo od toga da se optimalno rješenje pronalazi automatski numeričkom analizom potencijala na površini tla.

13.1.1. Matematički model

Potencijal strujnog polja pri protjecanju struje I_z kroz linijski element duljine L koji je u homogenoj sredini otpornosti ρ_z iznosi:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{4\pi L} \int_0^L \frac{\mathrm{d}l}{r_d} \tag{13.1–1}$$

gdje je:

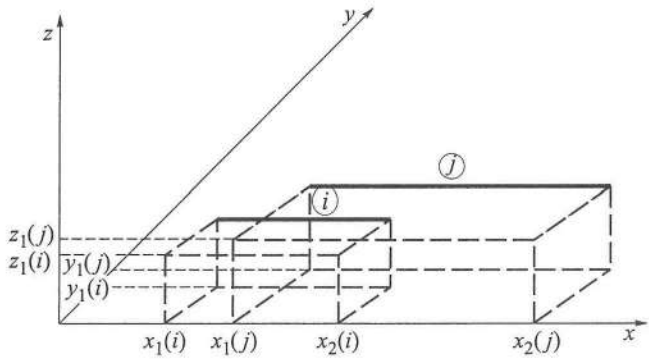
I_z struja zemljospoja, tj. ukupna struja kroz uzemljivač

r_d udaljenost dijelova elementa do promatrane točke u prostoru.

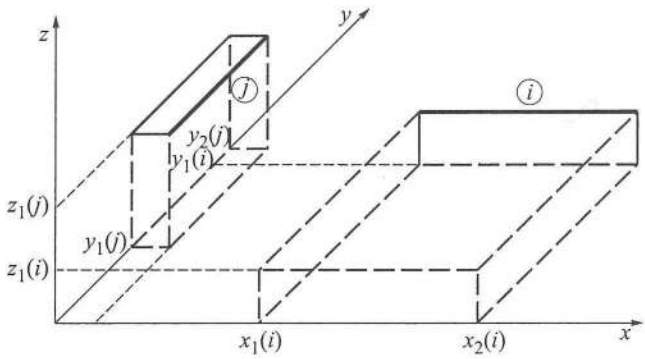
Pretpostavimo da imamo samo dva pravocrtna elementa, međusobno paralelna, slika 13.1–1 ili okomita, slika 13.1–2 tada je potencijal jednog od njih, ako kroz drugi protječe struja I_z, iznosi:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{4\pi L_1 L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \frac{\mathrm{d}l_1 \mathrm{d}l_2}{r_d} \tag{13.1–2}$$

Rješenje tog dvostrukog integrala za okomite i paralelne elemente osnova je proračuna potencijala bilo kakvoga prostornog rasporeda elemenata.



Sl. 13.1–1. Slučaj međusobno paralelnih dvaju pravocrtnih elemenata.



Sl. 13.1–2. Slučaj dvaju međusobno okomitih pravocrtnih elemenata.

Ako sada pretpostavimo da je uzemljivač sastavljen od n linijskih elemenata, onda je doprinos i-tog elementa potencijalu nekog j-tog elementa:

$$V_j = I_{zi} \cdot K_{ij} \tag{13.1–3}$$

gdje je:

I_{zi} struja kroz i-ti vodič uzemljivača

K_{ij} koeficijent potencijala (njegovo značenje jasno je iz jednadžbe (13.1–2)).

Potencijal j-tog elementa jednak je zbroju potencijala svih n elemenata, uključujući i vlastiti potencijal, pa se može izraziti jednadžbom:

$$V_j = I_{z1} \cdot K_{1j} + I_{z2} \cdot K_{2j} + I_{z3} \cdot K_{3j} \ldots + I_{zi} \cdot K_{ij} + \ldots + I_{zn} \cdot K_{nj} \tag{13.1–4}$$

Na toj jednadžbi formira se sustav od n linearnih jednadžbi, koje se mogu prikazati u matričnom obliku na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{z1} \\ I_{z2} \\ I_{z3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{zn} \end{bmatrix} \tag{13.1–5}$$

Polazi se od pretpostavke da je uzemljivač beskonačne vodljivosti, pa su potencijali svih elemenata jednaki i jednaki naponu uzemljivača U_0:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \ldots U_0 \tag{13.1–6}$$

Zbroj svih struja kroz elemente jednak je ukupnoj struji kroz uzemljivač I_z, pa se rješenje sustava jednadžbi dobiva proračunom struja kroz pojedine elemente:

$$I_{zj} = \frac{D_{nj}}{D_r} \tag{13.1–7}$$

gdje je:

D_{nj} subdeterminanta sustava

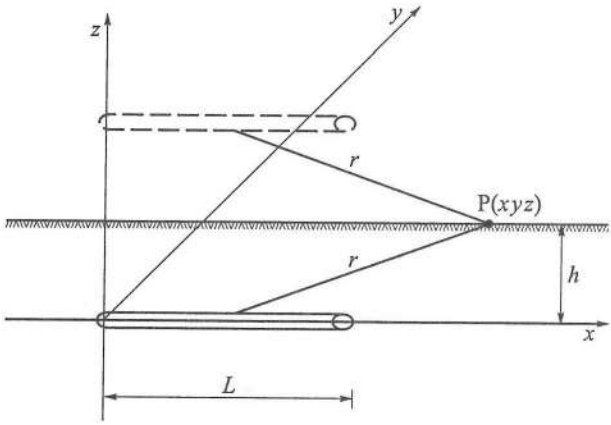
D_r determinanta sustava.

Iz toga slijedi otpor uzemljenja uzemljivača:

$$R_z = \frac{V}{\sum_{i=1}^{n} I_i} = \frac{U_0}{I_z} \tag{13.1–8}$$

Potencijal na površini tla računa se preko zbroja koeficijenata potencijala od svih n elemenata i njihovih zrcalnih slika. Ako se zadržimo na pretpostavci da je tlo homogeno i da je element uzemljivača duljine L ukopan na dubinu h, prema slici 13.1–3, onda je potencijal na površini u točki $P(x, y)$:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \int_0^{L_1} \frac{\mathrm{d}x}{\sqrt{(x-L)^2 - Y^2 + h^2}} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{h^2 + Y^2 + X^2} + X}{\sqrt{(X - L_1)^2 + Y^2 + h^2} + X - L_1} \tag{13.1–9}$$



Sl. 13.1–3. Raspored i odnosi kod izračunavanja potencijala u točki P.

Ako je element uzemljivača okomita sonda, onda je:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{4\pi L} \ln \frac{\sqrt{X^2 + (Y + L_1)^2} + Y + L_1}{\sqrt{X^2 + (Y - L_1)^2} + Y - L_1} \tag{13.1–10}$$

Pretpostavka je da je ishodište koordinatnog sustava na površini tla, u točki zabijanja sonde.

Ukupni potencijal u točki P(x, y) iznosi:

$$V_p = \sum_{i=1}^{n} V_i \qquad (13.1\text{–}11)$$

13.1.2. Napuci za projektiranje uzemljivača

Dosadašnje analize koje su provedene ovom računalnom obradom prijašnjih, konvencionalnim postupkom projektiranih uzemljenja visokonaponskih postrojenja pokazale su značajne mogućnosti unapređenja. Tako se na ovom primjeru pokazalo da su moguće uštede i do 40 % u odnosu na projektom predviđeno rješenje.

Jedna je od polaznih pretpostavki uspješne uporabe ovih programa mjerenje otpornosti i odgovarajuća analiza geološke strukture tla. Moguće uštede u izvedbi neće uvijek biti prednost računalne obrade. Štoviše, mogla bi se smatrati čak i važnijom ona prednost koja se dobije pouzdanijim proračunom napona koraka i dodirnog napona, te razradom rješenja potpuno prilagođenog stvarnoj situaciji.

Pored redovnih poslova u projektiranju, program ima primjenu i pri analizi nekih načelnih pitanja koncepcije dimenzioniranja uzemljenja elektroenergetskih objekata. To su primjerice pitanja uzemljenja ograde postrojenja, uporabe sonda u sustavu mrežastog uzemljivača, učinka dubine polaganja i sl. Program se koristi i u praksi dimenzioniranja uzemljenja stupova dalekovoda, ali to je manje značajna primjena. Može se učinkovito iskoristiti za izračunavanje tzv. konstanti otpora uzemljenja (otpora za jediničnu vrijednost otpornosti tla) tipskih rješenja uzemljenja stupova. Propisi za gradnju dalekovoda napustili su prethodnu praksu kontrole napona koraka i dodira.

13.2. IZVEDBA UZEMLJIVAČA U TRANSFORMATORSKIM STANICAMA 10(20)/0,4 kV I LINIJSKOM RASTAVLJAČU

13.2.1. Izvedba uzemljivača u TS 10(20)/0,4 kV u uvjetima uzemljenog zvjezdišta putem otpornika, s ograničenjem struje zemljospoja na vrijednost 150 A ili 300 A

Ako je neutralna točka mreže 10(20) kV u TS 10(20)/0,4 kV uzemljena otpornikom, u cilju ostvarivanja malog otpora uzemljenja obično se izvodi združeno uzemljenje: zaštitno, radno i gromobransko (uzemljenje odvodnika prenapona itd.). Združeno uzemljenje podrazumijeva spajanje više različitih vrsta uzemljivača. Ukupni otpor združenog uzemljenja R_{zdr}, uvažavajući utjecaj kabela s vodljivim plaštom kao uzemljivačem te utjecaj susjednih trafostanica i objekata koji su spojeni na neutralni vodič niskonaponske mreže, treba zadovoljiti uvjet:

$$R_{\text{zdr}} \leq \frac{U_d}{r_{\text{rf}} \cdot I_{KZ}} \tag{13.2–1}$$

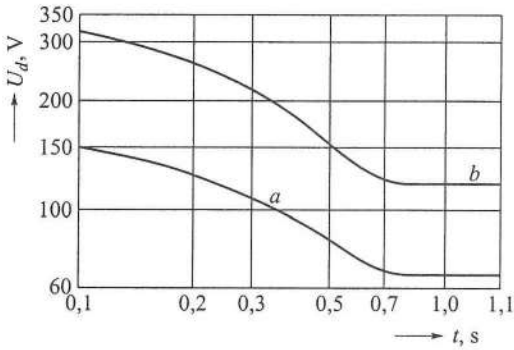
gdje je:

r_{rf} redukcijski faktor pojnog voda (omjer struje kroz plašt ili uzemljivač pojnog voda i ukupne struje zemljospoja)

I_{KZ} struja zemljospoja jednopolnog kratkog spoja, obično je $I_{KZ} \leq 300$ A ili $I_{KZ} \leq 150$ A.

Napon dodira U_d definiran je u [17], u ovisnosti o trajanju kvara (v. sl. 13.2–1), i to za:

- krivulju *a* ako je u niskonaponskoj mreži primijenjeno nulovanje ili uzemljenje zajedničkim uzemljenjem
- krivulju *b* ako je u niskonaponskoj mreži primijenjen koji drugi sustav zaštite od previsokoga dodirnog napona, i ako povišenje potencijala neutralnog vodiča ne može prouzročiti pojavu i održavanje visokog potencijala i dodirnog napona na kućištima aparata i elementima niskonaponske mreže.



Sl. 13.2–1. Dodirni napon U_d u ovisnosti o trajanju kvara t za različite vrste zaštite od opasnoga dodirnog napona po krivulji *a* i *b*.

Ako u nekoj TS 10(20)/0,4 kV nije moguće ispuniti uvjete napona dodira prema slici 13.2–1, radno uzemljenje mora se izvesti odvojeno od zaštitnog uzemljenja i mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

- ukupni otpor radnog uzemljenja R_0 mora zadovoljiti uvjete primijenjene zaštite od visokog napona dodira u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača
- ukupni otpor zaštitnog uzemljenja R_{zz} mjeren u trafostanici bez odvajanja zaštitnog uzemljenja od drugih uzemljivača koji su na njega spojeni treba zadovoljiti uvjet:

$$R_{zz} \leq \frac{1200}{r_{\text{rf}} \cdot I_{KZ}}, \tag{13.2–2}$$

Vrijednost 1200 u (13.2–2) slijedi iz omjera $1200/2000 = 0{,}6$, tj. faktora sigurnosti od $1/0{,}6 = 1{,}667$ izolacije u trafostanici da izdrži napon od 1200 V iako je

dimenzionirana na probojni napon od 2000 V. Redukcijski je faktor r_{rf} za priključak TS 10(20)/0,4 kV na nadzemni vod bez zaštitnog užeta $r_{rf} = 1$, sa zaštitnim vodom nešto nižim od 1, $r_{rf} < 1$ (treba izračunati od primjera do primjera), za kabelski priključak s VN strane (ukoliko se metalni plašt ili posebno položeni trakasti uzemljivač spoji na masu) $r_{rf} < 1$, a kod kabela sa željeznim plaštem (IPO 13, EHP81, PP41 i sl.) mogu biti znatno niži od 1 te također treba izračunati za svaki primjer.

Poseban je doprinos smanjenju redukcijskog faktora r_{rf} spajanje uzemljenja TS 10(20) kV na kabelski plašt ili na posebne trakaste uzemljivače (kod kabela XHP 48) koji se polažu pored tih kabela u cilju spajanja uzemljenja trafostanica. Također je moguće znatno smanjiti redukcijski faktor r_{rf} spajanjem uzemljenja objekta (zgrade) na sustav združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV.

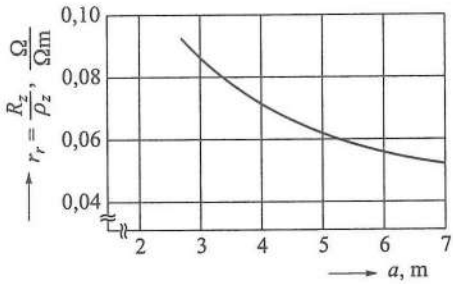
Redukcijski faktori zaštitnih užadi nadzemnih vodova i metalnih plašteva kabela dosta su temeljito obrađeni za različite vrste kabela i zaštitnih užadi u normi HD 637 S1:1999, dodatak J.

Ako se u TS 10(20)/0,4 kV izvodi združeno uzemljenje, onda se otpor takve stanice R_{zdr} može približno odrediti s pomoću formule:

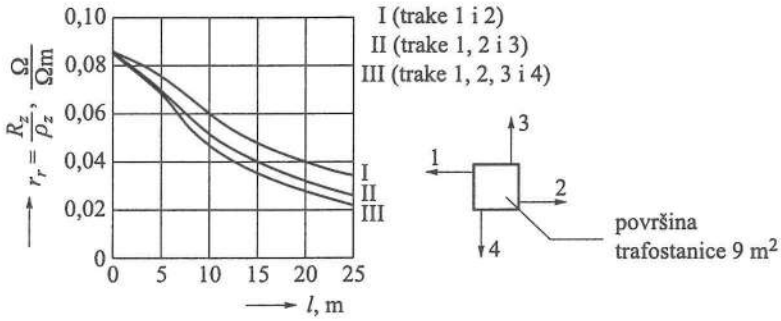
$$\frac{1}{R_{zdr}} = \frac{1}{R_{TS}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{R_{zi}} \qquad (13.2\text{–}3)$$

U gornjoj formuli uzet je u obzir otpor uzemljivača same stanice R_{TS} i otpori traka za uzemljenje na pojedinim stupovima mreže niskog napona R_{zi} kojima se uzemljuje neutralni vodič. Otpor uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV ovisi u prvom redu o konfiguraciji uzemljivača i otpornosti tla.

Kod TS 10(20)/0,4 kV, koje su smještene u vlastitom objektu (npr. u tornjiću), uzemljivač se najmanje mora sastojati od temeljnog uzemljivača i vanjskog prstena ukopanog na udaljenosti od 1 m od objekta i spojenog na temeljni uzemljivač. Otpor uzemljenja takve konfiguracije može se očitati sa slike 13.2–2 u ovisnosti o veličini a stranica nadomjesnog kvadrata: $a = \sqrt{A}$, gdje je A tlocrtna površina uzemljivača zgrade u kojoj se nalazi trafostanica, primjerice za $a = 5$ m, $R_z/\rho_z = 0{,}06$ i $\rho_z = 100$ Ωm, $R_z = 0{,}06 \cdot 100 = 6$ Ω. Otpor opisanog uzemljivača može se smanjiti spajanjem dodatnih traka na vanjski prsten. Otpor uzemljenja takve konfiguracije može se očitati na slici 13.2–3.



Sl. 13.2–2. Omjer R_z/ρ_z uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV tipa »tornjić« s jednim prstenastim uzemljivačem duljine jedne stranice a, m.



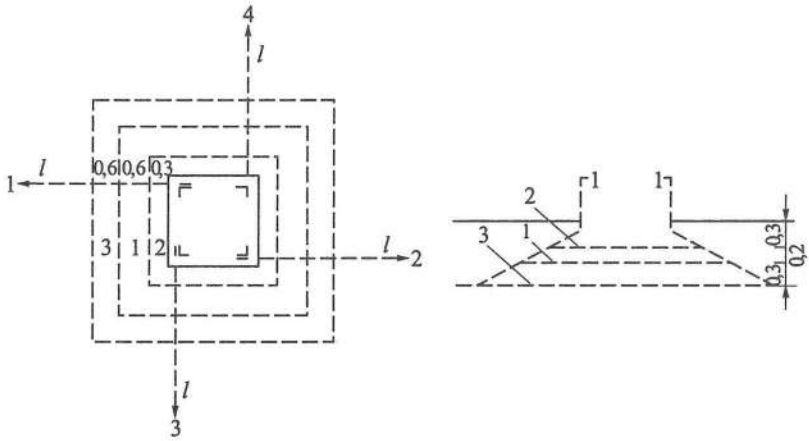
Sl. 13.2–3. Omjer R_z/ρ_z uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV tipa »tornjić« za površinu trafostanice 9 m^2 i sa zrakastim uzemljivačima duljine l.

Kod stupnih TS 10(20)/0,4 kV uzemljivač trafostanice sastoji se najmanje od jednog prstena udaljenog 1 m od stupa. Jedinični otpor uzemljenja takve konfiguracije za tipičnu stupnu stanicu može se približno odrediti s pomoću izraza:

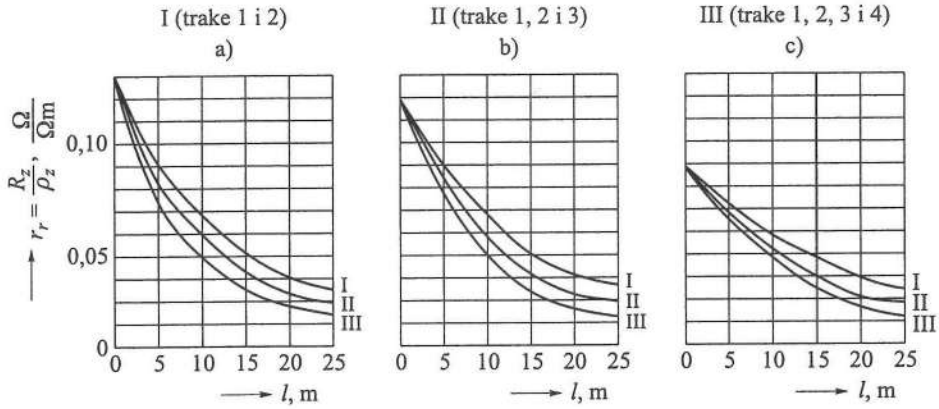
$$R_{ST} = 0{,}13 \cdot \rho_z \qquad (13.2\text{–}4)$$

Otpor uzemljivača stupne stanice može se smanjiti uporabom konfiguracija na slici 13.2–4. Na slici 13.2–5 prikazani su jedinični otpori uzemljenja tih konfiguracija. Dijagram a) odnosi se na konfiguraciju s jednim prstenom (br. 1) i s dvije zrake (1 i 2) duljine l, dijagram b) odnosi se na konfiguraciju s dva prstena br. (1 i 2) i s tri zrake (1, 2 i 3) duljine l, dijagram c), odnosi se na konfiguraciju sa tri prstena (br. 1, 2 i 3) i s četiri zrake (1, 2, 3 i 4), duljine l.

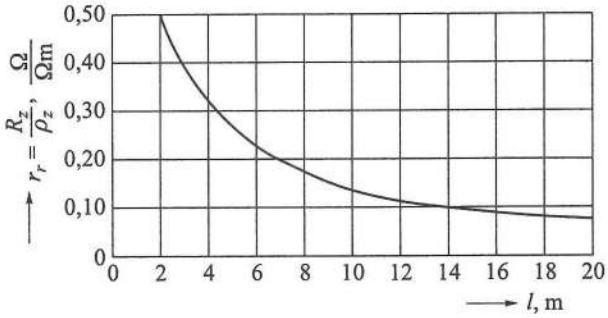
Otpor uzemljenja jednoga kratkog trakastoga uzemljivača kojim se uzemljuje neutralni vodič može se očitati sa slike 13.2–6.



Sl. 13.2–4. Uzemljivač stupne trafostanice, sa tri prstenasta uzemljivača (1, 2 i 3) i četiri zrakasta uzemljivača duljine l.



Sl. 13.2–5. Otpori uzemljivača stupne trafostanice, sa tri prstenasta uzemljivača sa zrakastim uzemljivačima duljine l.

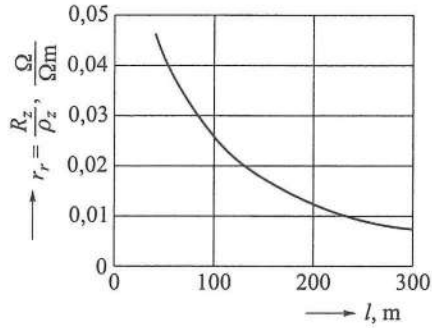


Sl. 13.2–6. Omjer R_z/ρ_z radnog uzemljenja trakastog uzemljivača za uzemljenje neutralne točke TS 10(20)/0,4 kV u ovisnosti o duljini l za dubinu ukopa h = 0,5 m).

Ako TS 10(20)/0,4 kV napaja kabelsku mrežu 0,4 kV, također se može upotrijebiti izraz (13.2–3), s time što se otpor R_{zi} odnosi na trake položene uz kabele niskog napona. Otpor uzemljenja dugačkoga trakastog uzemljivača za dubinu ukopa 0,5 m može se očitati sa slike 13.2–7.

Potrebno je upozoriti da se u proračunu uzimaju samo trake u kabelskim rovovima koji se razilaze u bitno različitim smjerovima. Ako se kabeli dugo vode paralelno, uzima se u obzir samo jedna uzemljivačka traka. Kod TS 10(20)/0,4 kV s razdvojenim uzemljenjem otpor zaštitnog uzemljenja R_{zz} može se očitati sa slika 13.2–2, 13.2–3 i 13.2–6 poznavajući otpornost tla ρ_z.

Poteškoća je izloženog pristupa u činjenici da korisnik transformatorske stanice obično ne raspolaže rezultatima mjerenja otpornosti tla na promatranim mjestima. Otpornost tla tada se može procijeniti na temelju podataka iz tablice 13.2–1 i drugih priručnika.



Sl. 13.2–7. Otpor uzemljenja dugačkoga trakastog uzemljivača u ovisnosti o duljini l za dubinu ukopa $h = 0{,}5$ m.

13.2.2. Izvođenje radnog i zaštitnog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV u uvjetima uzemljenog zvjezdišta 10(20) kV mreže sa združenim, odnosno odvojenim, radnim i zaštitnim uzemljenjem

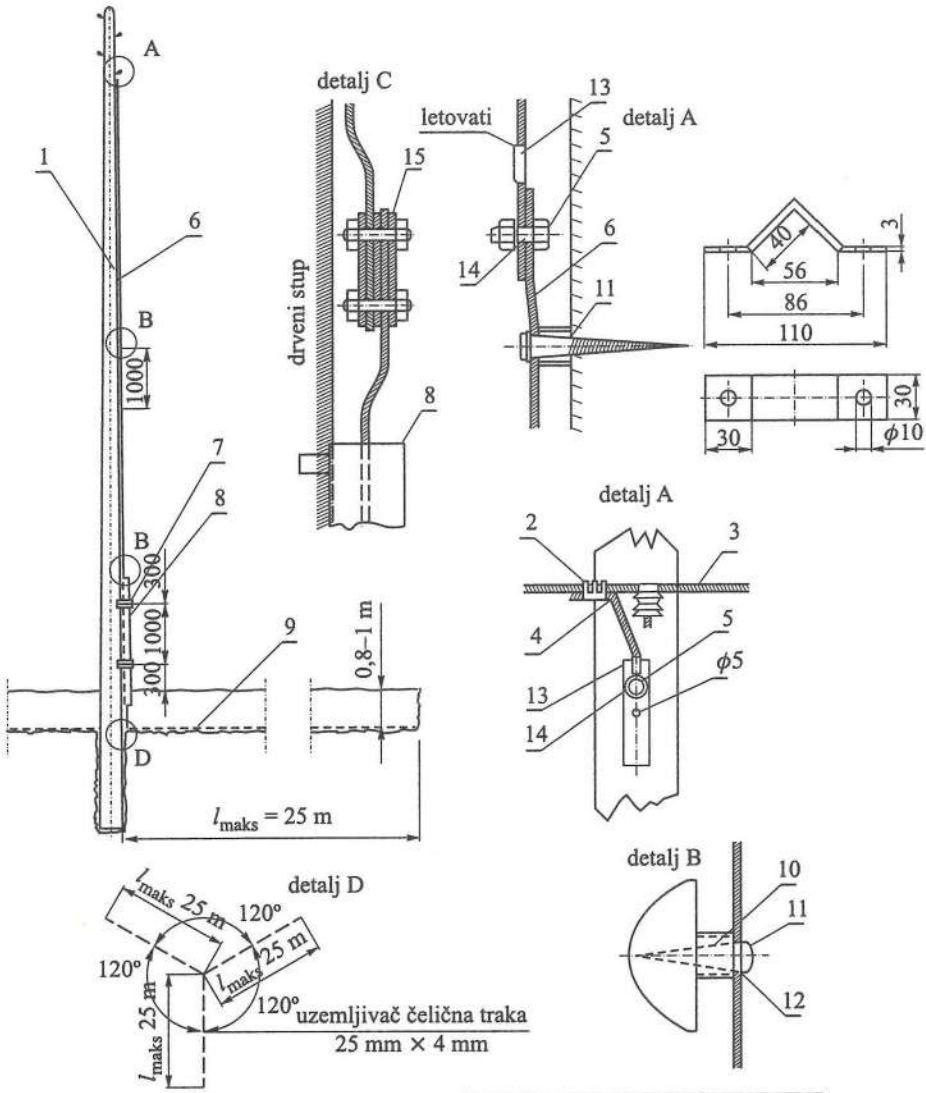
Radno uzemljenje izvodi se odvojeno od ostalih uzemljenja ili združeno uz povoljan redukcijski faktor radi smanjenja struje zemljospoja kroz uzemljivač i time smanjenja napona dodira i koraka. Uzemljenje se izvodi s trakastim uzemljivačem i dodavanjem štapnih uzemljivača (cijevi).

Trakaste uzemljivače treba u pravilu izvoditi zvjezdasto s više pramenova (pod kutom od najmanje 60°), a naročito kod veće vrijednosti otpornosti tla, jer je to jeftinije i kvalitetnije.

U tablici 13.2.–1 dane su potrebne duljine trakastog uzemljivača (traka 30 × 4 mm) ukopanog u dubinu 0,5 m za izvođenje u liniji i zvjezdasto s tri i šest krakova, za vrijednost otpora uzemljenja 5 Ω (kako se to obično propisima zahtijeva).

Tablica 13.2–1. Duljine trakastih i zrakastih uzemljivača za otpornost ρ_z i za ostvarivanje otpora uzemljenja uzemljivača od 5 Ω.

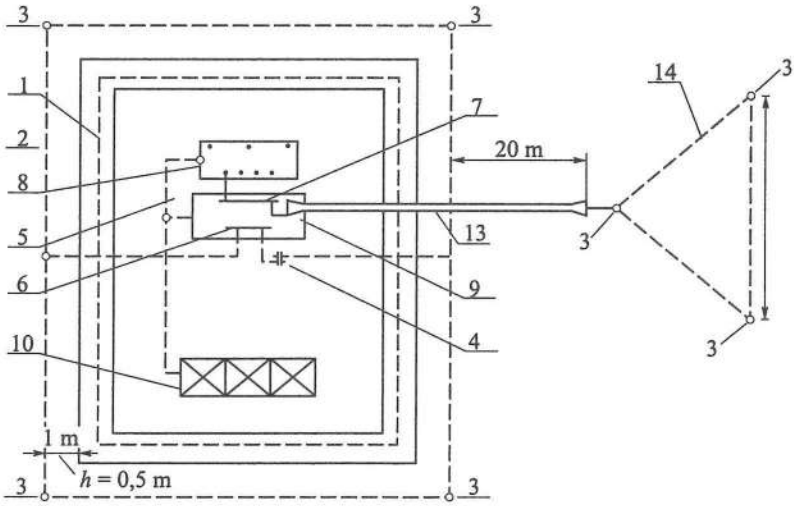
Otpornost tla, ρ_z, Ωm	50	100	150	200	500
Duljina trakastog uzemljivača u liniji l, m	17	38	62	88	nije korisno
Duljina trakastog uzemljivača s tri kraka, m	–	3 × 11 = 33 m	3 × 17 = 51 m	3 × 22 = 66 m	nije korisno
Duljina trakastog uzemljivača sa šest krakova, m		nije nužno upotrijebiti šest krakova			6 × 31 = 186 m



KOM.	NAZIV POZICIJE	POZ.	MAT.
2	ukrsni komad	15	
1	pocin.podl.ploč.	14	
1	kabelska papučica	13	
7	podložna pločica	12	
11	zavrtanj za drvo	11	
7	odstojnik	10	Al
1	čel. pocinčana traka	9	
1	NPL 50'50'1700	8	č. 0019
2	jednostr. obujmica	7	č. 3712
1	čel. pocinčana traka	6	
1	poč. zavrt. s mat.	5	
	uže prema nul-vodu	4	Cu
	nulti provodnik	3	Al–Fe
1	strujna stezaljka	2	Al–Cu
1	stup	1	drvo

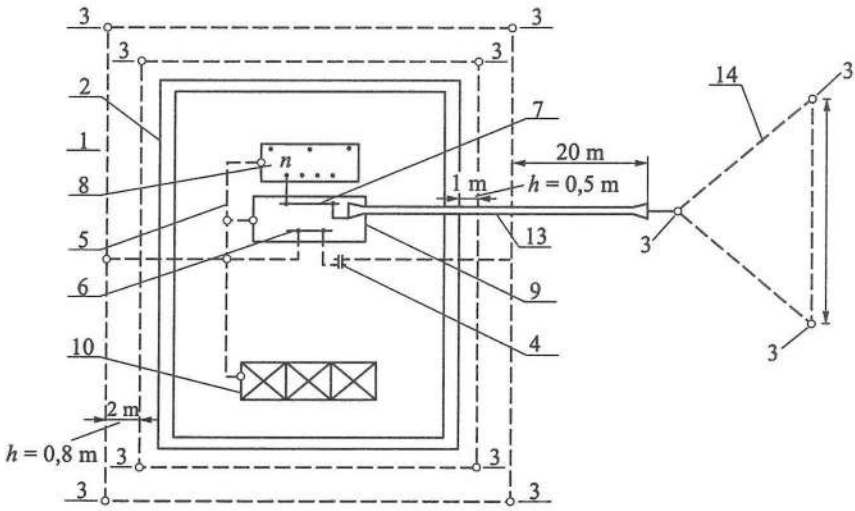
Napomena:
Sav spusni vod premazati srebrnastom broncom u cilju zaštite od korozije.
Ukrsni komad u zemlji na mjestu račvanja trake (detalj D) zaliti kabelskom masom radi korozije.

Sl. 13.2.–8. Način izvođenja radnog uzemljenja na stupu s trakastim uzemljivačem [27].

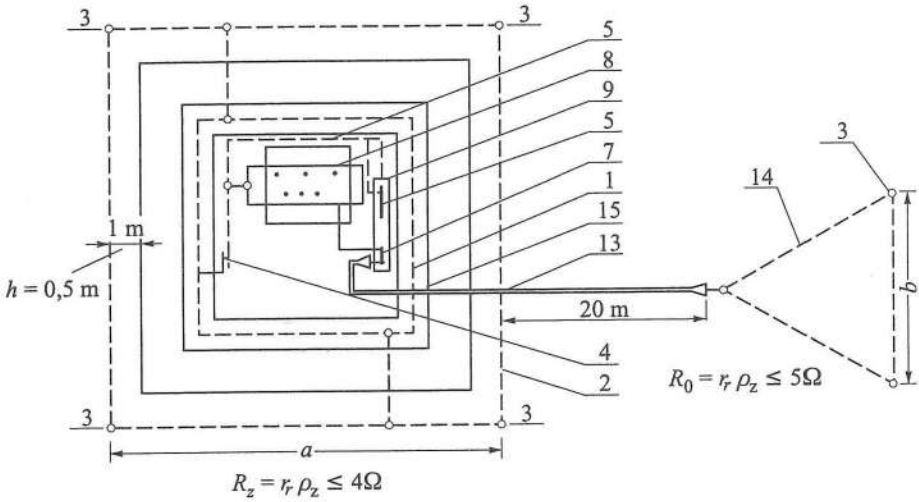


1. Temeljni uzemljivač TS VN/NN
2. Vanjska kontura užeta Cu 50 mm^2
3. FeZn cijevi (sonde) ϕ75,5 mm × 2 m
4. Ispitna spojnica zaštitnog uzemljivača
5. Izjednačavanje potencijala unutar TS VN/NN FeZn 30 mm × 4 mm
6. Zaštitna sabirnica
7. Nulta sabirnica
8. Transformator snage
9. Niskonaponski razvod
10. Blok visokog napona
13. Kabel 1 kV, PP00 1 × 50 mm^2
14. Uže Cu 50 mm^2

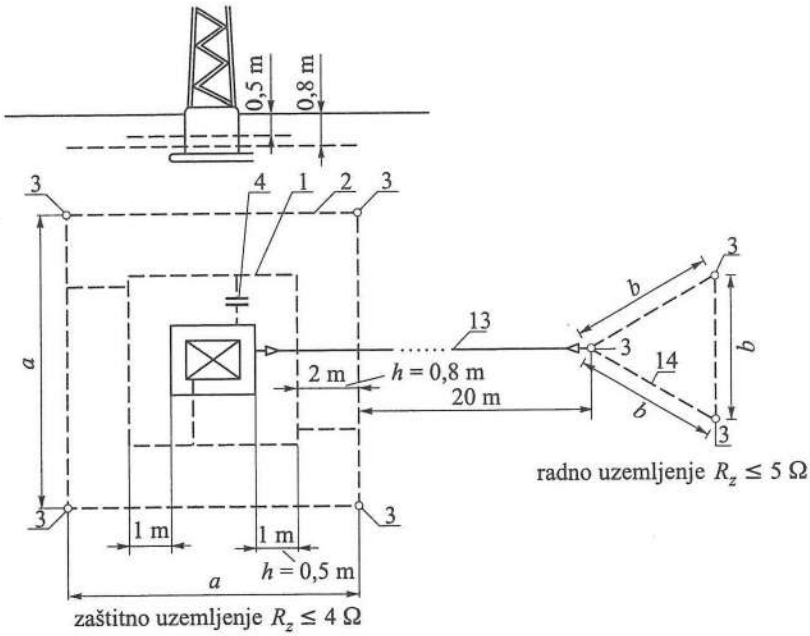
Sl. 13.2–9. Način izvođenja odvojenog zaštitnog i radnog uzemljenja na TS 10(20)/0,4 kV u primjeru kada otpor trafostanice ima temeljni uzemljivač.



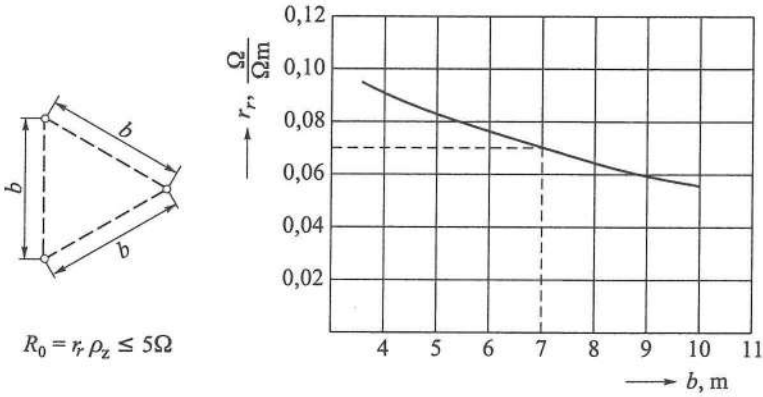
Sl. 13.2–10. Način izvođenja odvojenog zaštitnog i radnog uzemljenja na TS 10(20)/0,4 kV u primjeru kada otpor trafostanice nema temeljni uzemljivač (oznake su prema slici 13.2–9).



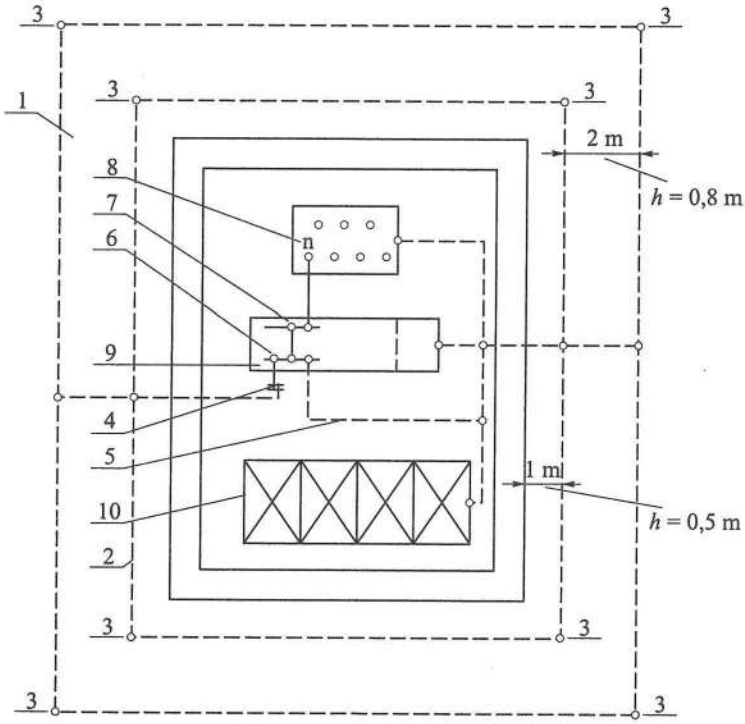
Sl. 13.2.–11. Uzemljenje TS 10(20)/0,4 kV »tornjić« s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem (oznake su prema slici 13.2–9).



Sl. 13.2.–12. Uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem (oznake su prema slici 13.2–9).

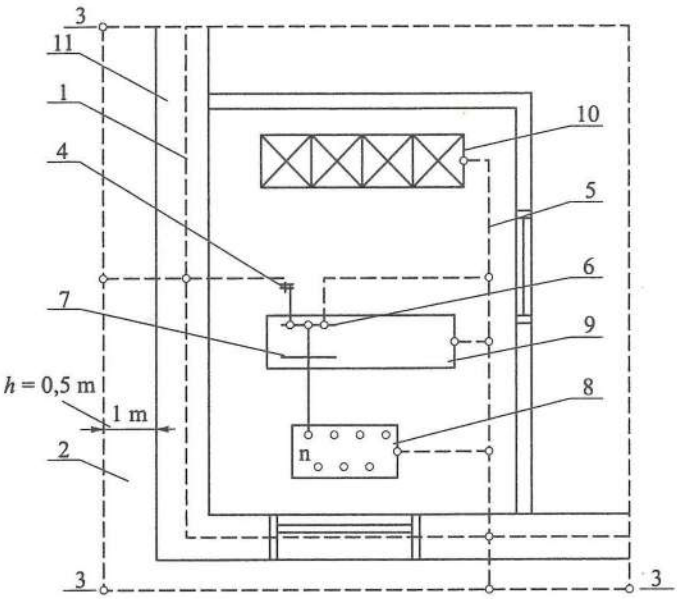


Sl. 13.2–13. Ovisnost faktora r_r trokutastog uzemljivača o duljini b [27].



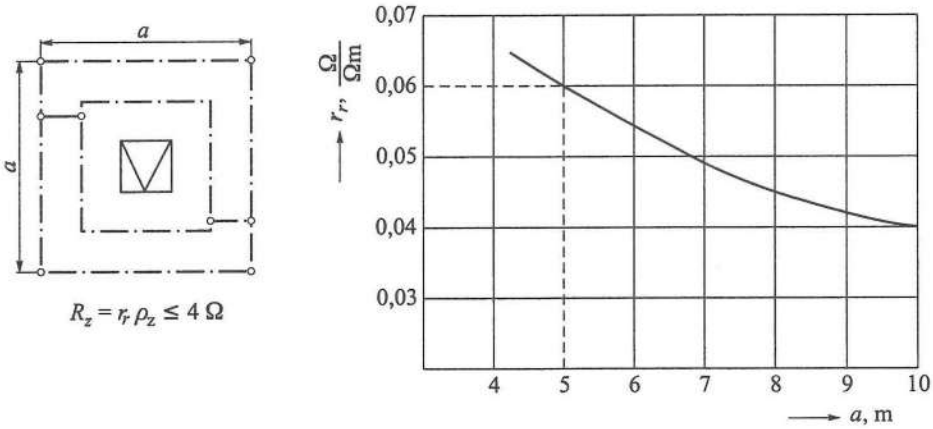
Sl. 13.2–14. Združeno uzemljenje TS 10(20)/0,4 kV za poseban slobodnostojeći objekt koji je izveden s dva prstenasta uzemljivača i štapnim uzemljivačima na kutovima (oznake su prema slici 13.2–9).

Na slici 13.2–8 detaljno je prikazan način izvođenja radnog uzemljenja s trakastim uzemljivačem s tri kraka. Uzemljenje se obično izvodi zrakasto, radi veće ekonomičnosti i povoljnosti glede odvoda atmosferskih prenapona, jer se s tim uzemljenji-



Sl. 13.2–15. Izvođenje združenog uzemljenja u TS 10(20)/0,4 kV s pomoću temeljnog uzemljivača objekta i prstenastog uzemljivača (oznake su prema slici 13.2–9).

ma spaja uzemljenje odvodnika prenapona. Taj se način primjenjuje kod uzemljenja prvih niskonaponskih stupova u mreži. Pri izvođenju radnog uzemljenja na trafostanici dobra su rješenja da se radno uzemljenje izvodi u vidu trokuta sa sondama u kutovima kao što je to prikazano na slikama od 13.2–9 do 13.2–15.



Sl. 13.2–16. Ovisnost faktora r_r dvokonturnog uzemljivača o duljini a. Iz faktora r_r izračunamo otpor zaštitnog uzemljenja za poznatu otpornost ρ_z.

Za izvedbe uzemljenja s trakama u obliku trokuta (stranica b) i sondama u kutovima, otpor uzemljenja izračuna se tako da za duljinu trake b očitamo vrijednost r_r iz dijagrama na slici 13.2–13 i izračunamo otpor radnog uzemljenja $R_0 = r_r \rho_z$. Faktor r_r omjer je otpora uzemljenja i otpornosti tla, iz kojeg izračunamo otpor uzemljenja (u ovom primjeru radnog uzemljenja R_0) za otpornost tla ρ_z.

Otpor uzemljenja dvokonturnoga kvadratnog uzemljivača računa se s pomoću dijagrama na slici 13.2–16 [27].

Primjer 13A

Kolika je najmanja duljina stranice vanjske konture uzemljivača zaštitnog uzemljenja stupne TS ili TS oblika »tornjića«, ako je otpor uzemljenja ograničen na 4 Ω, a otpornost tla $\rho_z = 100$ Ωm.

Računamo:

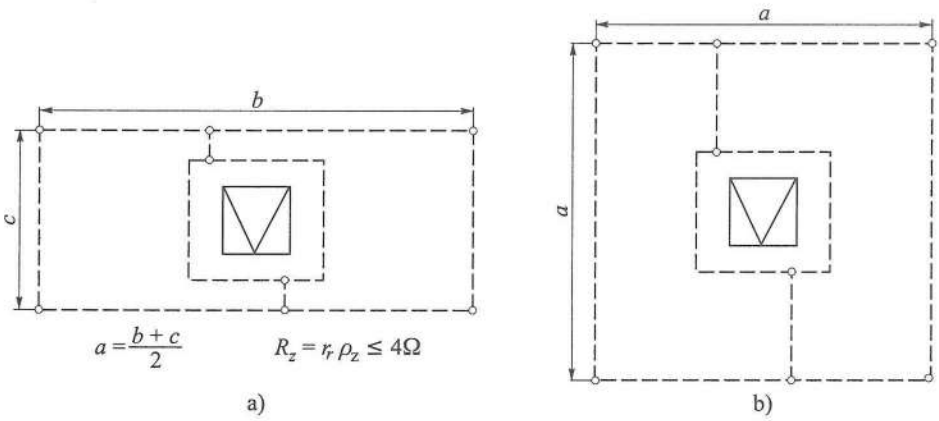
$$R_z = r_r \cdot \rho_z = 4\,\Omega$$

$$r_r = 0{,}04$$

Iz dijagrama na slici 13.2–16 vidi se da su uvjeti limitiranog otpora uzemljenja od 4 Ω zadovoljeni, ako je $a \geq 10$ m.

Primjer 13B

Distribucijska TS locirana je tako da raspoloživi prostor za izvođenje uzemljivača u jednom smjeru iznosi $c = 5$ m. Kolika je duljina druge stranice vanjske konture b uzemljivača ako je otpornost tla $\rho_z = 100$ Ωm, a otpor uzemljenja ograničen na 4 Ω?



Sl. 13.2–17. Proračun otpora uzemljenja dvokonturnoga pravokutnog uzemljivača: uzemljivač TS a) i ekvivalentni uzemljivač b).

$$R_z = r_r \cdot \rho_z = 4\,\Omega$$

$$r_r = 0{,}04$$

Iz dijagrama na slici 13.2–16 vidi se da je za $r_r = 0{,}04$ a duljina ekvivalentnoga kvadratnog uzemljivača $a = 10$ m.

Primjer proračuna otpora uzemljenja dvokonturnoga pravokutnog uzemljivača.

Duljina realnog uzemljivača iznosi:

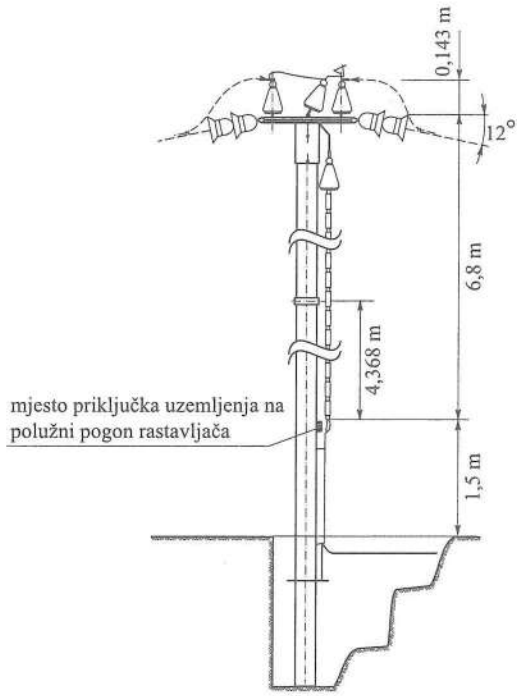
$$a = \frac{b+c}{2}$$

$$b = 2a - c = 2 \cdot 10 - 5 = 15 \text{ m}$$

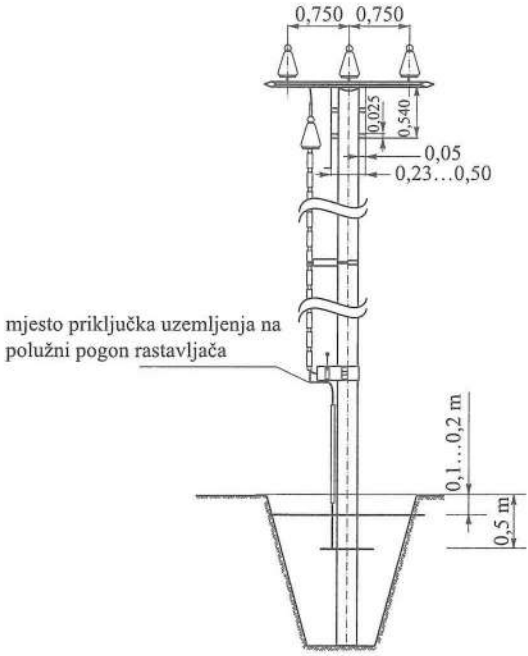
13.2.3. Izvođenje uzemljenja linijskog rastavljača s oblikovanjem potencijala na manipulativnoj površini

S obzirom da linijskim rastavljačima rukuju ljudi, te da je u nadzemnoj mreži 10(20) kV veliki broj linijskih rastavljača, za učinkovitu zaštitu od opasnog napona dodira i koraka potrebno je obratiti pozornost na sljedeće:

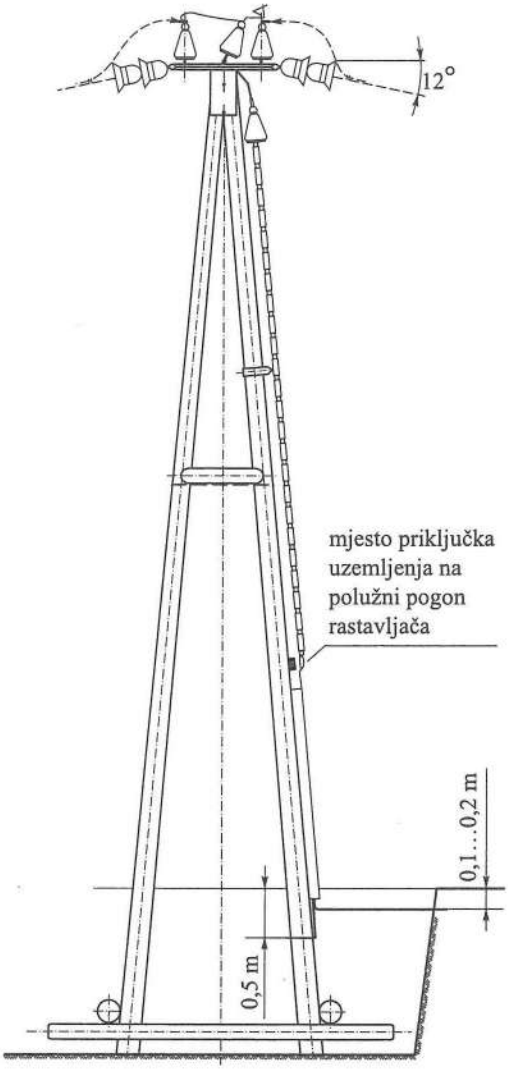
- Za nadzemnu mrežu 10(20) kV s izoliranim zvjezdištem neutralne točke transformatora, struja zemljospoja I_z ograničena je na 20 A ili eventualno pri relativno velikoj duljini galvanski spojene mreže na 30 A. Zato je lako izvesti uzemljenje i oblikovanje potencijala kako je prikazano na slikama.
- I pri ovom uzemljenju pozornost treba obratiti na mjesto priključka uzemljenja na polužni pogon, mehaničku zaštitu odvoda od mjesta priključka do ulaska u zemlju (u dubinu do 20 cm).
- Navedena rješenja oblikovanja potencijala, koja odgovaraju izoliranoj mreži 10(20) kV, pokazala su se zadovoljavajuća, jednostavna i jeftina.
- Rješenja su dana za drvene stupove, a mogu se primijeniti i za betonske i željezno-rešetkaste stupove.
- Za mrežu od 10(20) kV s uzemljenom neutralnom točkom preko otpora s ograničenjem struje na 300 A, predložena rješenja treba preurediti i mjerenjem dokazati da su napon dodira i koraka u dopuštenim iznosima.



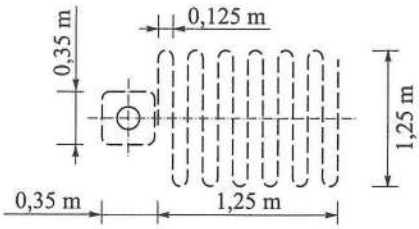
Sl. 13.2–18. Rastavljač na nosnom stupu (pogled okomito na trasu voda).



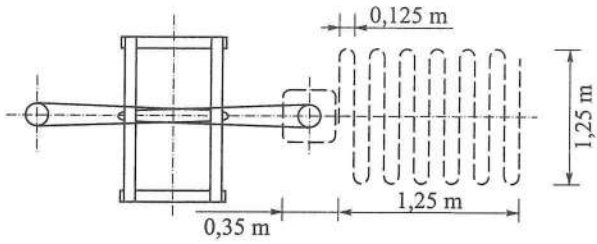
Sl. 13.2–19. Rastavljač na nosnom stupu (pogled u smjeru trase voda).



Sl. 13.2–20. Rastavljač na stupu *A*.



Sl. 13.2–21. Uzemljenje rastavljača na nosnom stupu i oblikovanje potencijala stajališta.



Sl. 13.2–22. Uzemljenje linijskog rastavljača na kutno zateznom stupu (*A* stupu) s oblikovanjem potencijala stajališta.

13.3. UZEMLJIVAČI STUPOVA NADZEMNIH VODOVA VISOKOG NAPONA

13.3.1. Uzemljivači stupova nadzemnih vodova od 10(20) kV s uzemljenom neutralnom točkom preko otpora

Zbog uporabe vodljivih materijala za gradnju stupova distribucijskih vodova pojavila se potreba uzemljenja konstrukcije i provedbe mjera zaštite od pojave prevelikih potencijala na stupu ili okolnom terenu. Ovisno o uzroku pojave potencijala postavlja se zaštita prilagođena minimumu potrebne sigurnosti određene propisima. Tako nastaju uobičajena ili tipska rješenja za određenu vrstu objekta, ekonomski prihvatljiva i opravdana u nekom načinu rada.

Jedna je od takvih promjena planirani prelazak distributivnih vodova na rad s uzemljenom neutralnom točkom, vezano obično, uz prijelaz na napon 20 kV. Sve su češći zahtjevi za preispitivanjem valjanosti uzemljivača postojećih ili novograđenih vodova s uobičajenim rješenjima, potkrijepljeni i uvjetima strožim od propisima određenih.

13.3.2. Tipski uzemljivači

Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova [50] određeni su uvjeti koje moraju zadovoljiti uzemljivači dalekovodnih stupova od vodljivog materijala. Općenito, uzemljivačima stupova treba postići sljedeće:

a) sigurnost voda, tj. u što većoj mjeri spriječiti pojavu povratnog preskoka pri pražnjenju atmosferskih prenapona
b) sigurnost ljudi, tj. otkloniti opasnost od opasnoga dodirnog napona i napona koraka pri zemljospoju.

Stupanj postignute sigurnosti voda kompromis je potreba i ekonomskih pokazatelja (ovisi o važnosti i ugroženosti voda). Glede drugog kriterija osnovno je podići

zaštitu od opasnog napona dodira i koraka na konstrukciji stupa ili oko njega u slučaju kvara na vodu.

Uzimajući u obzir vjerojatnost istodobnog nastanka opasnosti i nalaženja na ugroženom području, te dužinu trajanja i veličinu struja koje prolaze kroz uzemljivač, smatra se dovoljnim postaviti uzemljivač u obliku prstena oko temelja stupa na odgovarajućoj dubini i udaljenosti.

Pri izvođenju uzemljenja neutralne točke mreže 10(20) kV putem otpora i ograničenjem struje zemljospoja na 150 A ili 300 A, u takvu mrežu ugrađuje se i zemljospojna zaštita koja djeluje brzo (obično 0,5 s) te smo prema dijagramu slika 13.2–1 ograničili dodirni napon zaštitnog uzemljenja na 150 V.

13.3.3. Tipski uzemljivači čeličnih stupova

Za čelično-rešetkaste stupove distribucijskih dalekovoda s blok-temeljima uobičajeni su uzemljivači u obliku dvaju prstena i dvaju krakova, $2P + 2L$. Prsteni se polažu na dubini od 0,5 m i 0,7 m, na udaljenosti 0,2 m i 1 m od temelja. Kraci se spuštaju s dva dijametralno suprotna pojasnika stupa, spajaju prstene i produžuju na dubini od 0,7 m u smjeru trase voda, odnosno prema tlu što bolje vodljivosti, a dugi su obično 10 m.

Uzemljivači pojedinih stupova razlikuju se ovisno o veličini betonskog temelja, međutim to bitno ne mijenja otpor jer su kraci iste duljine. Radi složenosti svih veličina, ovdje je provedeno razmatranje za najmanji tipski uzemljivač, primjer 13C. To rješenje duljinom ukopane trake daje zadovoljavajuće otpore uzemljenja za otpornost tla do približno 100 Ωm, a oblikom zadovoljava osnovne uvjete u zemljištu s većom otpornošću tla.

Često je zbog posebnih uvjeta pojedinoga stupnog mjesta, uzemljivač potrebno drukčije formirati, što se, uglavnom, odnosi na smjer polaganja trakastih uzemljivača. Međutim, to obično ne utječe bitno na veličinu otpora uzemljenja.

Izlazne liste kompletnog proračuna tipskog i jednoga deformiranog uzemljivača dane su u primjerima 13C i 13E. Račun je proveden na računalu, uporabom programa za mrežaste uzemljivače. Temelji se na određivanju potencijala na površini iznad uzemljivača kao zbroju doprinosa linijskih elemenata

$$V_{ji} = I_{zi} \cdot VDF_{ij} \tag{13.3–1}$$

gdje je:

I_{zi} struja kroz linijski i-ti element uzemljivača

VDF_{ij} koeficijent potencijala, odnosno naponski distribucijski faktor, ovisan o prostornom odnosu i-tog i j-tog elementa.

Potencijal u bilo kojoj točki x udaljenoj od osi vodoravnoga odnosno uspravnog uzemljivača, zanemarujući dubinu ukopa h ($h = 0$), određuje se prema sljedećem izrazu:

$$V_{xh} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} + \frac{L}{2}}{\sqrt{x^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \frac{L}{2}} \tag{13.3–2}$$

gdje je:

x udaljenost od osi elementa, m

I_z ukupna struja kroz element, A

L ukupna duljina jediničnog (vodoravnog ili uspravnog) uzemljivača, m

V_{xh} potencijal na udaljenosti x od uzemljivača u okomitom smjeru od uzemljivača

I_{zi} struja zemljospoja kroz i-ti element uzemljivača.

Računanjem ukupnog potencijala bilo kojeg elementa kao zbroja vlastitog potencijala i doprinosa svih ostalih elemenata formira se sustav n-linearnih jednadžbi potencijala:

$$V = I_z \cdot VDF \tag{13.3–3}$$

Budući da se pretpostavlja da je potencijal svih elemenata uzemljivača jednak (zanemarenje otpora trake), ukupni otpor konfiguracije iznosi:

$$R_z = \frac{V}{\sum_{i=1}^{n} I_{zi}} \tag{13.3–4}$$

Izračunani podaci i grafički prikaz vrijede za homogeno tlo otpornosti $\rho_z = 100$ Ωm. Odgovarajuća vrijednost za homogena tla drugih otpora proporcionalna je omjerima otpornosti tla.

13.3.4. Izrada uzemljenja stupova za zaštitu od atmosferskih pražnjenja

Budući da propisani uvjeti zaštite od atmosferskih pražnjenja ne ovise o načinu rada mreže (izolirano ili uzemljeno zvjezdište), oni u ovom razmatranju nisu presudni, pa ih ne treba posebno obraditi. Može se samo istražiti u kojoj je mjeri dalekovod 20 kV zaštićen tipskim uzemljivačem.

Smatra se da do povratnog preskoka ne dolazi ako je otpor uzemljenja stupa:

$$R_z \leq \frac{U_i}{I_u} \tag{13.3–5}$$

gdje je:

R_z otpor zaštitnog uzemljenja stupa dalekovoda, za koji smo u ovom primjeru uzeli da je 6,9 Ω,

U_i podnošljivi udarni napon izolacije, npr. za stupanj izolacije $S_i = 24$, tj. za nazivni napon od 20 kV, iznosi najmanje 125 kV,

I_u tjemena vrijednost udarne struje groma, kA.

Obrnuto gledano, tipski uzemljivač zadovoljava sljedeće struje groma

$$I_u \leq \frac{U_i}{R_z} \leq \frac{125 \cdot 10^3}{6{,}9} = 18{,}1 \text{ kA}$$

Prema statistikama, taj iznos nije premašen u približno 76 % slučajeva udara groma.

Račun je proveden za pretpostavljenu otpornost tla od $\rho_z = 100$ Ωm, a odgovarajuća vrijednost za druge vrste tla može se približno odrediti linearnim preračunavanjem obrnuto proporcionalno veličinama otpornosti.

13.3.5. Zaštita od pogonskog napona

Opasnost od opasnoga dodirnog napona nastaje u slučaju pada dijelova pod naponom na konstrukciju stupa ili proboja izolacije. Ovisno o načinu rada mreže, propisi posebno određuju uvjete uzemljenja stupa.

a) Mreže s izoliranim zvjezdištem

$$R_n \leq \frac{U_z}{I_z} \tag{13.3–6}$$

gdje je:

U_z najveći dopušteni napon uzemljivača (125 V),

I_z stvarna struja zemljospoja koja teče na mjestu kvara.

Obrnuti račun za tipski uzemljivač i tlo otpornosti $\rho_z = 100$ Ωm daje:

$$I_z \leq \frac{U_z}{R_n} = \frac{125}{6{,}9} = 18{,}1 \text{ A}$$

Kako se taj iznos struje ne smije prekoračiti ni iz drugih razloga (podržavanje električnog luka), može se zaključiti da tipski uzemljivač u mrežama s izoliranim zvjezdištem na relativno vodljivom tlu uglavnom zadovoljava. Naime, struja je zemljospoja kod mreža s izoliranim zvjezdištem kapacitivna struja koja ovisi o duljini i vrsti galvanski spojenih vodova i prema *Pravilniku o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja* ograničena je na 20 A za nazivni napon 10 kV i 15 A za nazivni napon 20 kV. U razgranatim mrežama, posebno s velikim duljinama kabelskih vodova, kapacitivne struje postaju veće od narednih graničnih struja 15 i 20 A, te se prelazi na rad s uzemljenim zvjezdištem preko otpora, s ograničenjem struje zemljospoja na 150 A ili 300 A.

b) Mreže s uzemljenim zvjezdištem

Kako su kod tih mreža struje zemljospoja mnogo veće, tako se kod mreže 10(20) kV uzemljenjem zvjezdišta preko otpora s ograničenjem struje zemljospoja na 300 A

pojavi najveća struja I_z = 300 A, tj. znatno veća struja i veći potencijal na uzemljivaču stupa i mogućnost većega dodirnog napona i napona koraka. Vodovi se opremaju uređajima za automatsko brzo iskapčanje (APU), a time se vrijeme zemljospoja skraćuje, te se prema dijagramu na slici 13.2–1 povećava granična vrijednost opasnog dodirnog napona.

Uzimajući sve to u obzir, propisi kao dovoljnu mjeru predviđaju da se izvedbom uzemljivača u obliku jednoga ili dvaju prstenova oko temelja stupa oblikuje raspodjela potencijala i dodatno umanji opasnost.

Iz prethodnog se dakle vidi da se opisani tipski uzemljivač može upotrijebiti za uzemljenje 10(20) kV dalekovoda s izoliranom i uzemljenom nultom točkom preko otpora.

13.3.6. Posebni zahtjevi za smanjenje dodirnog napona i napona koraka

Posebni su zahtjevi za smanjenje dodirnog napona i napona koraka kod stupova na prometnim površinama ili u naseljenim mjestima. Posljedica su ili krivog tumačenja propisa ili, pak, težnje za većom sigurnošću.

Želi li se po tim kriterijima vrednovati uzemljivač, potrebno je prije svega odrediti koji se iznosi dodirnog napona i napona koraka ili dodira mogu smatrati bezopasnima. Bez dulje analize odabrane su dvije mogućnosti:

a) Napone koraka i dodira treba ograničiti na 65 V, to je najveći dopušteni iznos izvan elektroenergetskog postrojenja koji nije uvjetovan dužinom trajanja.
b) Bezopasni iznos dodirnog napona i napona koraka izračunan je prema najvećoj nefibrilirajućoj struji (struja koja ne izaziva štetne vibracije mišića srca). Obično se smatra da je kriterij a) previše krut, jer ograničava opasne napone neovisno o stvarnim uvjetima. Po drugom pak kriteriju u račun se uzima prijelazni otpor stajališta, pa se dopušteni iznosi razlikuju u ovisnosti o karakteristikama površine tla na kojem se nalazi stup.

Razmatranja će se provesti za slučaj prelaska distributivnog dalekovoda 10 kV na sustav 20 kV i uzemljeno zvjezdište. Preostala struja zemnog spoja po pretpostavci iznosi 150 A ili 300 A.

13.3.7. Rapodjela potencijala oko uzemljivača za područje galvanskog utjecaja

Proračun raspodjele potencijala na površini oko temelja stupa, prikazan u primjeru 13C, tablica 13.3–1, slika 13.3–2, za uzemljivač sa slike 13.3–1, proveden je za struju od 300 A na tipskom uzemljivaču u homogenom tlu otpornosti ρ_z = 100 Ωm. Kako bi rezultati mogli poslužiti i u drugim prilikama, krivulje raspodjele potencijala izračunane su kao relativni iznosi prema ukupnom naponu uzemljivača stupa.

Na slici 13.3–2 prikazana je raspodjela potencijala duž karakterističnih pravaca kojima se praktično mogu predočiti sva mjesta oko stupa. Iz dijagrama se očitavaju najveći iznosi dodirnog napona i napona koraka: $U_{d\text{maks}} = 21$ % i $U_{k\text{maks}} = 20$ % (od napona uzemljivača), i oni određuju područje najveće opasnosti oko stupa. Drugo područje umjerene opasnosti s naponom koraka do 10 % proteže se do približno 4 m udaljenosti od stupa i duž krakova uzemljivača s 2 m od njih. Treće područje male opasnosti ograničeno je 5 %-tnim naponom koraka. Izvan tog područja iznos je napona koraka bezopasan, pa nije potrebno provoditi mjere zaštite. Prikaz područja opasnosti tipskog uzemljivača iz primjera 13C, tlocrta na slici 13.3–1, dan je na slici 13.3–3.

13.3.8. Mogućnost zaštite od opasnoga dodirnog napona i napona koraka

Želi li se postići potpuna sigurnost po prvom kriteriju, napon koraka ili dodira na cijelom području oko stupa ne smije prekoračiti 65 V. Za tipski uzemljivač to je 20 % ukupnog napona uzemljivača:

$$U_z = \frac{100}{20} \cdot 65 = 325 \text{ V}$$

te za struju zemnog spoja $I_z = 300$ A potreban otpor uzemljenja stupa nadzemnog voda iznosi:

$$R_z = \frac{U_z}{I_z} = \frac{325}{300} = 1{,}08\ \Omega$$

Tako malen otpor uzemljenja tipskim bi uzemljivačem bilo moguće postići jedino u vrlo vodljivom tlu, što obično u praksi nije slučaj. Linearnom aproksimacijom prema računskoj vrijednosti za 100 Ωm, otpornost takvog tla iznosi:

$$\rho_z = \frac{100 \cdot 1{,}08}{6{,}9} = 15\ \Omega\text{m}$$

Za prosječno tlo otpornosti od $\rho_z = 100$ Ωm traženi otpor od 1,08 Ω bi se postigao s 300 m trake, što je ekonomski neopravdano. Neka su prihvatljiva ulaganja dodavanje tipskom uzemljivaču još dva kraka od po 10 m trake. Računski model tog uzemljivača s krivuljama raspodjele potencijala dan je u primjeru 13E, slika 13.3–5 i 13.3–7, za uzemljivače sa slika 13.3–4 i 13.3–6. Rezultati pokazuju da smanjenje otpora uzemljenja nije znatno, ali je nešto povoljnija raspodjela potencijala. Ostaje, dakle, činjenica da je punu bezopasnost praktično nemoguće postići smanjenjem otpora uzemljivača. Za zadovoljenje, pak, pune sigurnosti, izvan područja 5 %-tne opasnosti, potreban je otpor od 4,25 Ω. To, međutim, zahtijeva dodatne mjere zaštite u blizini stupa.

Provodi li se razmatranje prema drugom kriteriju, tj. prema nefibrilirajućoj struji, dopuštene su vrijednosti dodirnog napona i napona koraka, ovisno o zemljištu, znatno više. U tablicama od 13.3–2 do 13.3–4, u svezi s proračunom uzemljivača u primjeru 13C, dane su odgovarajuće vrijednosti za zemlju, šljunak i beton. Treba napomenuti da taj kriterij vrednovanja preporučuju propisi SAD-a, a većina nacionalnih propisa ga prihvaća. To je posebno obrađeno u više poglavlja ove publikacije.

Zbog nepoznavanja terena oko stupa, prihvaćen je mjerodavnim dodirni napon (što je nepovoljnije). Prema njemu izračunani podaci za područje najveće opasnosti dani su u tablici 13.3–1.

Odgovarajuće su veličine otpora za drugo i treće područje dvostruke, odnosno četverostruke. Ako se sada razmotri problem unatrag, čini se prihvatljivom sljedeća kombinacija:

- treće područje: $U_d =$ 5 %, zemlja, $R_z < 7{,}8\ \Omega$
- drugo područje: $U_d =$ 10 %, šljunak, $R_z < 5{,}86\ \Omega$
- prvo područje: $U_d =$ 20 %, asfalt, $R_z < 6{,}56\ \Omega$.

To ukazuje na olakšavajuće okolnosti. Naime, površine na kojima se provodi dodatna zaštita obično imaju neku namjenu i prema tome su uređene, zatravnjene, asfaltirane i sl. Ovisno o području oko stupa i vrsti površine moguće je u određenim slučajevima postići zadovoljavajuće rezultate. Praksa je pokazala da pošljunčanje ili asfaltiranje površine oko stupa, kao dodatna mjera zaštite nije potrebno, jer je na terenima dobre vodljivosti moguće poboljšati uzemljivač, a u kamenjaru je površinski sloj sam po sebi dobra zaštita. Osim toga, zahvati na terenu oko stupa zahtijevali bi širu analizu namjena, mogućnosti i važnosti terena, uključivanje drugih djelatnosti, izučavanje kakvoće i trajnosti materijala i, konačno, definiranje zahvata odgovarajućim propisima.

Kvalitetno najbolje rješenje istodobno je smanjenje otpora uzemljenja i relativnog iznosa dodirnog napona i napona koraka. Uzemljivač s četiri kraka, primjer 13E, slika 13.3–6, u tome je smislu često prihvatljivo rješenje. Moguće je i dodavanje prstena ali obično ne donosi poboljšanje razmjerno povećanju ulaganja. Drugo rješenje je polaganje uzemljivača na manji prostor, ili ukidanje krakova, čime se površina s potrebom zaštite smanji, ali se pooštre uvjeti. Ovdje pak treba paziti da je veličina otpora uzemljenja dovoljno mala. Ako se zaštita provodi na izgrađenom vodu, preporučuje se da se izmjeri otpor uzemljenja, snimi krivulja razdiobe potencijala oko stupa dalekovoda i zatim odredi način zaštite. Naime, uzemljivači u praksi često nemaju isti oblik nego su prilagođeni okolini.

a) Zaštita od opasnoga dodirnog napona i napona koraka pri atmosferskim pražnjenjima

- Dovoljno je izvesti tipski uzemljivač, čime se, ovisno o veličini otpora ili točnije o veličini impulsnog otpora uzemljenja, tj. uzemljenja za impulsnu struju munje, onemogućuje povratni preskok na vodič.
- Zbog veličine struje munje, smanjenje dodirnog napona i napona koraka praktično je nemoguće, a zbog kratkoće trajanja nije ni potrebno.

Razumljivo je da smanjenje otpora uzemljenja stupova dalekovoda pri uzemljenju nulte točke mreže preko otpora povoljno djeluje na smanjenje potencijala na stupu dalekovoda pri atmosferskom pražnjenju i manjih problema glede povratnog napona preskoka.

b) Zaštita od opasnoga dodirnog napona i napona koraka u slučaju kvara na vodu

- Na sustavima s izoliranom neutralnom točkom treba primijeniti tipski uzemljivač. On obično zadovoljava i propisani napon uzemljivača. Ako je zemljište oko stupa loše vodljivosti, prepušta se investitoru i distributeru odluka o tome opravdava li potreba za manjim otporom povećano ulaganje. Smatra se da je dodatak trake od 20 m za još dva kraka opravdan, daljnje povećanje obično ne dolazi u obzir.
- Na sustavima s uzemljenom neutralnom točkom treba primijeniti tipski uzemljivač u skladu sa čl. 87. Pravilnika. [16].
- Posebne mjere zaštite od napona dodira i koraka oko stupa mogu se provoditi:
  - smanjenjem otpora uzemljenja ako, s obzirom na tražena ulaganja i rezultate na konkretnom mjestu, ima opravdanja
  - onemogućenjem pristupa stupu ako uvjeti na terenu to omogućuju
  - izvedbom uzemljivača na manjem terenu i onemogućenjem pristupa ako dobiveni otpor uzemljivača omogućuje brzo iskapčanje.
- Zaštitu objekta u blizini (prema područjima opasnosti) treba izvršiti polaganjem uzemljivača na 1 m oko temelja objekta (zgrada, ograda i sl.) i na njega spojiti sve vodljive dijelove tog objekta. Taj uzemljivač ne smije se spajati na uzemljenje stupa (pasivni uzemljivač), osim ako njihova blizina to ne uvjetuje.

Ako se, zbog posebnih uvjeta na terenu, opisane mjere ne mogu izvesti, postoje sljedeće mogućnosti:

- uporaba neprobojnih izolatora i onemogućenje pada vodiča na konstrukciju
- specijalna dorada uzemljivača radi smanjenja otpora uzemljenja
- smanjenje struje i vremena trajanja zemnog spoja.

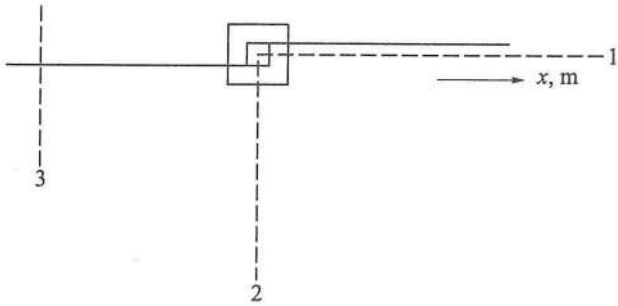
Primjer 13C

Proračunajte raspodjelu potencijala, dodirnog napona i napona koraka za 20 kV dalekovod s uzemljenom neutralnom točkom preko otpora s ograničenjem struje zemljospoja na 300 A. Podaci su sljedeći:

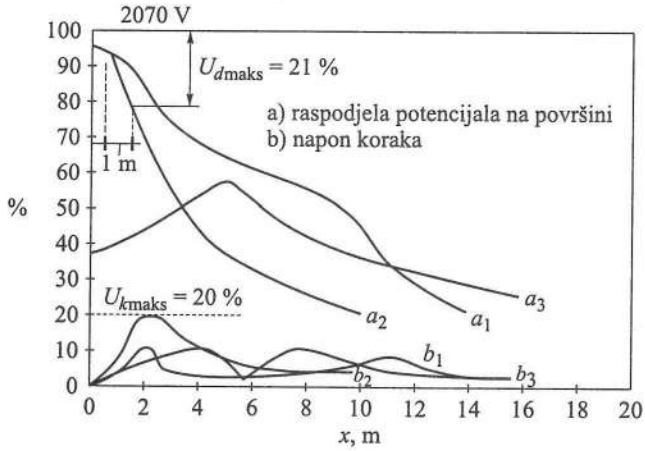
- naziv objekta: DV 20 kV
- upotrebljeni materijal: traka Fe 25 × 4 mm
- otpornost tla: $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja mjerodavna za dimenzioniranje uzemljivača: $I_z = 300$ A
- vrijeme trajanja struje kvara: 0,80 s
- dubina polaganja uzemljivača: 0,500 m

Rezultati proračuna:

- ukupni broj elemenata uzemljivača: 14
- broj aktivnih elemenata uzemljivača: 14
- sveukupna duljina elemenata uzemljivača: 34,40 m
- otpor uzemljenja: $R_z = 6{,}900\ \Omega$



Sl. 13.3–1. Tipski uzemljivač za proračun napona dodira i koraka po pravcu 1.



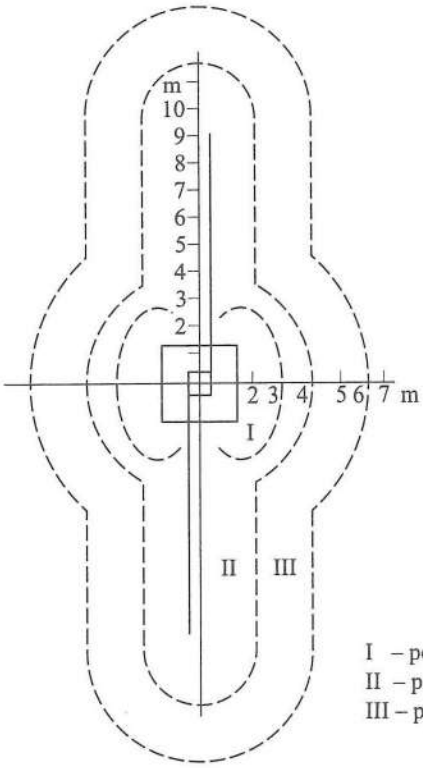
Sl. 13.3–2. Dijagram raspodjele potencijala i napon koraka na površini uzemljivača o udaljenosti x, m po pravcu 1 slika 13.3–1, gdje su: a_1, a_2 i a_3 krivulje raspodjele potencijala na površini zemlje za područje velikog utjecaja a_1, za područje manjeg utjecaja a_2 i područje malog utjecaja a_3. Krivulje b_1, b_2 i b_3 dijagrami su napona koraka za neradna područja I, II i III.

Tablica 13.3–1. Izračunani podaci za područje najveće opasnosti.

	U_d, V	U_z, V	I_z, A	R_z, Ω
zemlja	117	585	300	1,95
šljunak	176	880	300	2,93
beton	219	1095	300	3,65
asfalt	394	1970	300	6,56

Tablica 13.3–2. Dopuštene vrijednosti dodirnog napona i napona koraka.

	Prema propisima [49]	Prema najvećoj nefibrilirajućoj struji za otpornost površine tla ρ_z, Ωm		
Otpor tla ρ_z, Ωm	100	100	500	800
Dodirni napon U_d, V	65	117	176	219
Napon koraka U_k, V	65	161	394	568

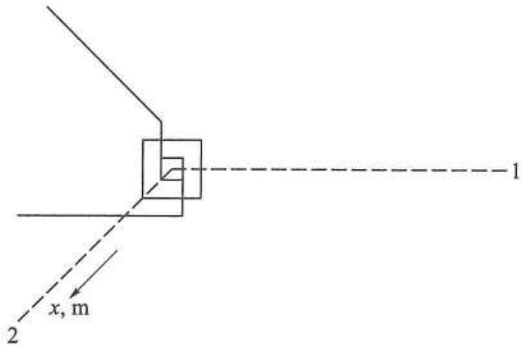


I – područje velikog utjecaja $U_k = 20$ %
II – područje manjeg utjecaja $U_k = 10$ %
III – područje malog utjecaja $U_k = 5$ %

Sl. 13.3–3. Prikaz područja utjecaja raspoređeno po područjima I, II i III.

Primjer 13D

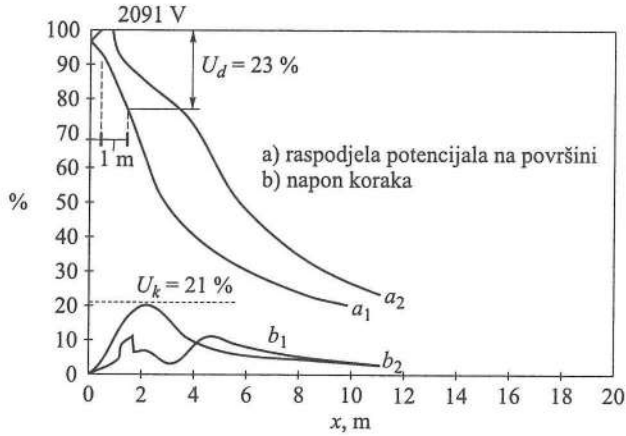
Podaci su kao u primjeru 13C, samo s tom razlikom da je broj elemenata uzemljivača 16. Izvedba je uzemljivača prema slici 13.3–4 s približno jednakim otporom uzemljenja $R_z = 6{,}969$ Ω. Rezultati proračuna dodirnog napona i napona koraka dani su u tablici 13.3–3, a raspodjela potencijala na slici 13.3–5.



Sl. 13.3–4. Tipski uzemljivač za proračun dodirnog napona i napona koraka po pravcu 2.

Tablica 13.3–3. Dopuštene vrijednosti dodirnog napona i napona koraka.

	Prema propisima [49]	Prema najvećoj nefibrilirajućoj struji za otpornost površine tla ρ_z, Ωm		
Otpor tla ρ_z, Ωm	100	100	500	2000
Dodirni napon U_d, V	65	117	176	394
Napon koraka U_k, V	65	161	394	1266

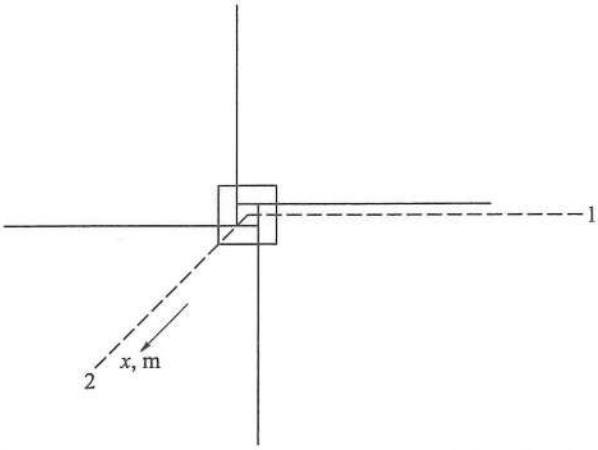


Sl. 13.3–5. Dijagram raspodjele potencijala na površini uzemljivača i napona koraka po pravcu 2 slike 13.3–4.

Primjer 13E

Podaci su kao u primjeru 13C, samo s tom razlikom da je sveukupna duljina trakastih uzemljivača l = 54,60 m i otpor uzemljenja R_z = 4,982 Ω. Izvedba je uzemljivača (trakas-

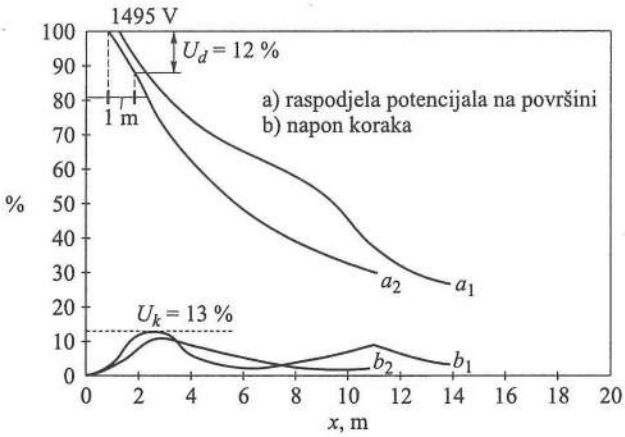
ti) prema slici 13.3–6. Rezultati proračuna dani su u tablici 13.3–4, a raspodjela potencijala na slici 13.3–7.



Sl. 13.3–6. Četverokraki uzemljivač za proračun napona dodira i koraka po pravcu 2.

Tablica 13.3–4. Dopuštene vrijednosti napona koraka i dodirnog napona.

	Prema propisima [49]	Prema najvećoj nefibrilirajućoj struji za otpornost površine tla ρ_z, Ωm		
Otpor tla ρ_z, Ωm	100	100	500	800
Dodirni napon U_d, V	65	117	176	219
Napon koraka U_k, V	65	161	394	568



Sl. 13.3–7. Dijagram raspodjele potencijala na površini i napona koraka po pravcu 2.

13.4. IZVOĐENJE UZEMLJENJA NA POSEBNIM OBJEKTIMA KOMBINACIJOM TRAKASTIH I ŠTAPNIH UZEMLJIVAČA

13.4.1. Posebni uvjeti za izvođenje uzemljenja na površinskom kopu

- Širok opseg snaga potrošačkih objekata zahtijeva veći broj naponskih razina pojne mreže.
- Sustav uzemljenja izveden je tako da sve trafostanice imaju posebne uzemljivače u sklopu postrojenja. Pokretni potrošački objekti (npr. bageri) spojeni su vodičima za uzemljenje s uzemljivačima postavljenim na početku i po duljini 6 kV pojnih vodova. Nepokretni potrošači (transportne trake i razvodni objekti) imaju posebne uzemljivače uz same objekte.
- Pokretljivost pojedinih potrošačkih objekata onemogućava gradnju posebnih uzemljivača za oblikovanje potencijala oko njih. Posljedica pokretljivosti objekata promjenljive su duljine pojnih vodova, što utječe na promjenu struje zemljospoja u pojnoj mreži.
- Pojni vodovi i oprema u većoj su mjeri izloženi kvarovima, a povećana je i vjerojatnost kontakta ljudi s uzemljenim objektima.
- Osjetan utjecaj na uvjete uzemljenja ima način uzemljenja neutralne točke pojne mreže.
- Mreža 110 kV ima izravno uzemljenje zvjezdišta, mreža 35 kV uzemljena je s malim otporima, a mreža 6 kV s izoliranim je zvjezdištem.

Iz navedenih razloga ti sustavi uzemljenja sastoje se od većeg broja uzemljivača raznih vrsta i namjena, koji su dani na sljedećim slikama u nacrtu izvedbe uzemljenja i vrijednostima otpora uzemljenja te dodirnog napona i napona koraka.

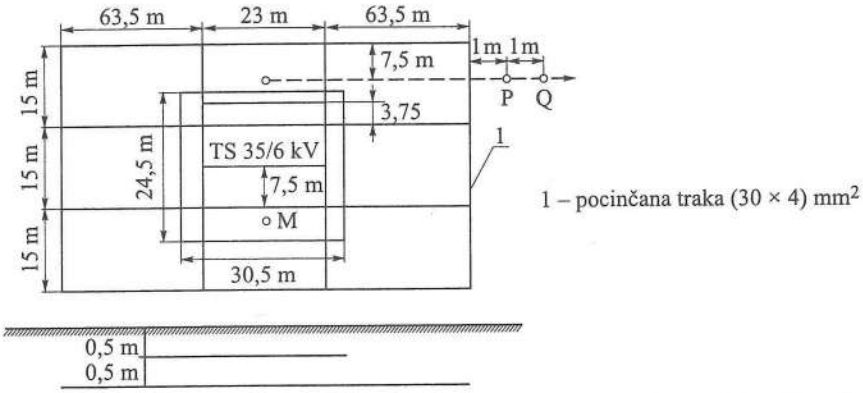
Na slici 13.4–1 prikazano je zaštitno uzemljenje TS 35/6 kV. Ti se uzemljivači prostiru i izvan postrojenja koje je unutar pravokutne konture (30,5 × 24,5) m^2, koja služi za oblikovanje potencijala oko ograde postrojenja. Ti su uzemljivači bez okomitih elemenata.

Na slici 13.4–2 prikazan je uzemljivač koji se upotrebljava kao zaštitno uzemljenje TS 6 kV/0,4 kV. Transformatorske stanice postavljene su iznad samih uzemljivača. Ovaj uzemljivač nije spojen s uzemljivačem na slici 13.4–6, već su prikazane četiri uzemljivačke konfiguracije.

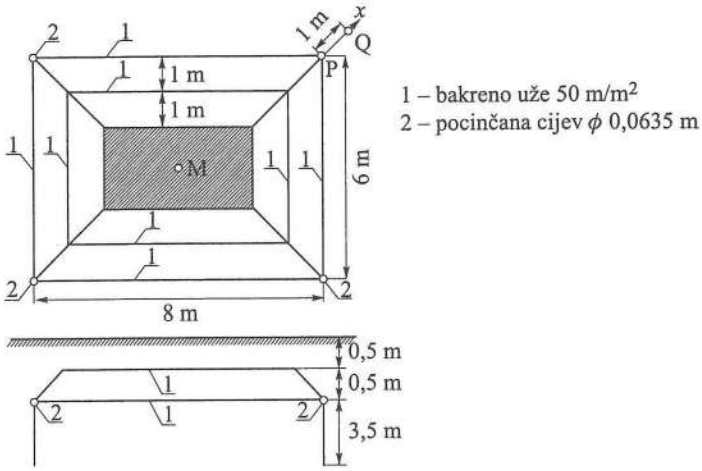
Na slici 13.4–3 i 13.4–4 prikazana su dva tipa uzemljivača koji se upotrebljavaju za uzemljenje pokretnih potrošačkih objekata.

Na slici 13.4–5 prikazan je uzemljivač za uzemljenje transportnih traka i pogonskih stanica za trake.

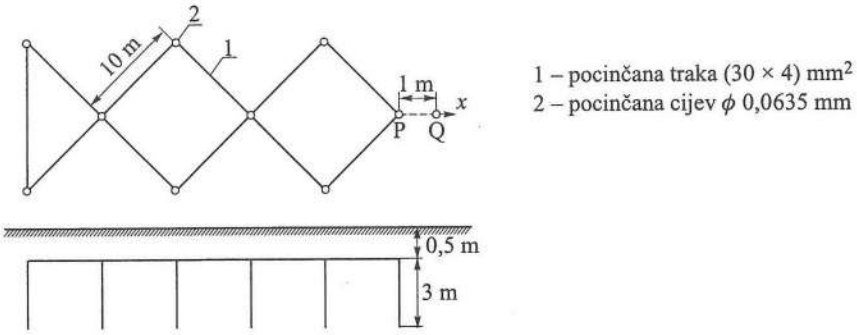
Na slici 13.4–6. prikazan je tipičan uzemljivač koji se upotrebljava kao radno uzemljenje TS 6 kV/0,4 kV. Takvi uzemljivači grade se izvan postrojenja i spojeni su s postrojenjima posebnim kabelom.



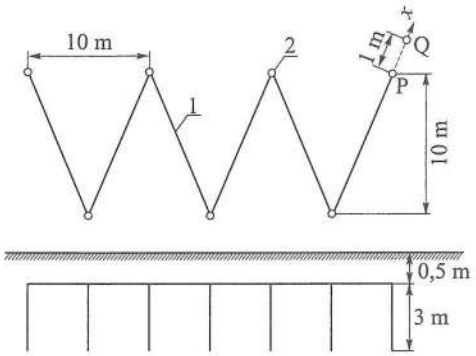
Sl. 13.4–1. Zaštitno uzemljenje TS 35 kV/6 kV s pocinčanom trakom, (30 × 4) mm^2.



Sl. 13.4–2. Zaštitno uzemljenje TS 6 kV/0,4 kV kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača.

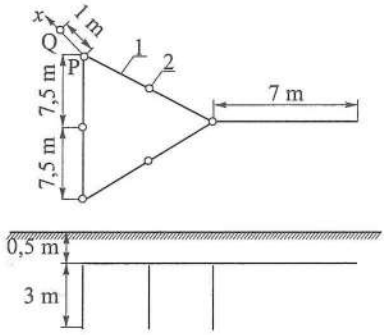


Sl. 13.4–3. Zaštitno uzemljenje pokretnog objekta kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača.



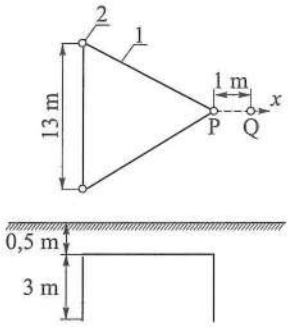
1 – pocinčana traka (30 × 4) mm²
2 – pocinčana cijev ϕ 0,0635 mm

Sl. 13.4–4. Zaštitno uzemljenje pokretnih objekata kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača.



1 – bakreno uže (30 × 4) mm²
2 – pocinčana cijev ϕ 0,0635 mm

Sl. 13.4–5. Zaštitno uzemljenje transportne trake kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača..



1 – bakreno uže (2 × 4) mm²
2 – pocinčana cijev ϕ 0,0635 mm

Sl. 13.4–6. Radno uzemljenje TS 6 kV/0,4 kV kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača.

Na slikama je označena točka M u kojoj se proračunava najveći napon dodira, pravac x koji je kritičan u pogledu napona koraka i točke P i Q između kojih je taj napon koraka najveći.

13.4.2. Rezultati analize

Analiza odabranih konfiguracija uzemljivača napravljena je na računalu uporabom matematičkog modela uzemljivača. Svi proračuni izrađeni su uz pretpostavku da je tlo homogeno, otpornosti ρ_z = 100 Ωm i preračunati su na otpornost tla ρ_z = 50 Ωm i 150 Ωm u omjeru $\rho_z/100$.

Za uzemljivače kombinirane od okomitih i vodoravnih elemenata proračun je izrađen za tri varijante:

- uz uzimanje u obzir samo vodoravnih elemenata
- uz uzimanje u obzir samo okomitih elemenata
- uz uzimanje u obzir vodoravnih i okomitih elemenata.

Vrijednosti su dodirnog napona U_d i napona koraka U_k izračunane u relativnom odnosu prema struji odvođenja I uzemljivača, u obliku U_d/I i U_k/I. Stvarne vrijednosti napona U_d i U_k dobiju se množenjem izračunatih vrijednosti U_d/I i U_k/I sa stvarnom strujom odvođenja uzemljivača.

Za uzemljivače pojnih objekata (trafostanice) na slikama 13.4–1 i 13.4–2 izračunane su vrijednosti otpora uzemljenja, najveći dodirni napon unutar postrojenja i najveći napon koraka na kritičnom pravcu. Rezultati proračuna za te uzemljivače dani su u tablicama 13.4–1 i 13.4–2. U tim i u svim ostalim tablicama H označava da su uzeti u obzir vodoravni elementi, V samo uspravni, a $H + V$ obje vrste elemenata.

Tablica 13.4–1. Rezultati proračuna zaštitnog uzemljivače sa slike 13.4–1.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon	
		koraka U_k/I (V/A)	dodira U_d/I (V/A)
H	0,57222	0,03082	0,05933

Tablica 13.4–2. Rezultati proračuna za uzemljivač na slici 13.4–2.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon	
		koraka U_k/I (V/A)	dodira U_d/I (V/A)
H	5,91750	0,87254	1,96224
$H+V$	4,74095	0,63112	1,14214

Za uzemljivače objekata u mreži izračunane su vrijednosti otpora uzemljenja i napona koraka na kritičnom pravcu. Dodirni naponi nisu izračunani jer se provjera dodirnog napona radi za dio sustava uzemljenja, a ne za svaki uzemljivač pojedinačno.

Rezultati proračuna za uzemljivače objekata prikazani su na slikama od 13.4–3 do 13.4–6 i dani su u tablicama od 13.4–3 do 13.4–6.

Tablica 13.4–3. Rezultati proračuna za uzemljivače sa slike 13.4–3.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon koraka U_k/I, V/A
H	3,66025	0,41705
V	4,72077	0,40103
$H+V$	2,97333	0,43518

Tablica 13.4–4. Rezultati proračuna za uzemljivače sa slike 13.4–4.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon koraka U_k/I, V/A
H	2,61366	0,45216
V	3,81751	0,32411
$H+V$	2,29675	0,41909

Tablica 13.4–5. Rezultati proračuna za uzemljivače sa slike 13.4–5.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon koraka U_k/I, V/A
H	4,25524	0,59982
V	5,67482	0,32125
$H+V$	3,60165	0,49577

Tablica 13.4–6. Rezultati proračuna za uzemljivače sa slike 13.4–6.

Elementi	Otpor uzemljenja ρ_z, Ω	Najveći relativni napon koraka U_k/I, V/A
H	5,70656	1,10622
V	9,58598	0,8659
$H+V$	4,80665	1,03348

U svezi s načinom uzemljenja neutralne točke u mrežama 6 kV i 35 kV, najveće su struje jednostrukog zemljospoja 30 A i 300 A. Predviđeno vrijeme isključenja kvara je 0,5 s u mreži od 35 kV, odnosno 0,2...0,5 s u mreži od 6 kV, ovisno o tome je li mreža kabelska ili kombinirana. U mreži od 0,4 kV primijenjena je zaštita nulovanjem.

Vrijednosti otpornosti tla za ove terene kreću se u opsegu od 50...150 Ωm. Na osnovi izračunanih relativnih najvećih vrijednosti dodirnog napona i napona koraka za analizirane uzemljivače na slikama od 13.4–1 do 13.4–6 i navedenih vrijednosti struja jednostrukog zemljospoja, u tablicama 13.4–7 i 13.4–8 dane su stvarne najveće vrijednosti dodirnog napona U_d i koraka U_k za nekoliko vrijednosti otpornosti tla.

Tablica 13.4–7. Najveće vrijednosti dodirnog napona U_d za uzemljivače na slikama 13.4–1 i 13.4–2 za nekoliko vrijednosti otpornosti tla ρ_z.

Uzemljivač sa slike	Najveća struja zemljospoja, A	Elementi	Najveći dodirni napon U_d, V		
			$\rho_z = 50\ \Omega m$	$\rho_z = 100\ \Omega m$	$\rho_z = 150\ \Omega m$
13.4–1	300	H	8,90	17,80	26,70
13.4–2	30	H	29,43	58,86	88,29
		$H + V$	17,13	34,26	51,39

Tablica 13.4–8. Najveće vrijednosti napona koraka za uzemljivače na slikama za nekoliko vrijednosti otpornosti tla ρ_z.

Uzemljivač sa slike	Najveća struja zemljospoja, A	Elementi	Najveći dodirni napon U_d, V		
			$\rho_z = 50\ \Omega m$	$\rho_z = 100\ \Omega m$	$\rho_z = 150\ \Omega m$
13.4–1	300	H	4,63	9,25	13,88
13.4–2	30	H	13,09	26,18	39,27
		$H + V$	9,47	18,93	28,40
13.4–3	30	H	6,26	12,51	18,77
		V	6,53	13,06	19,58
		$H + V$	6,02	12,03	18,05
13.4–4	30	H	6,78	13,56	20,35
		V	4,86	9,72	14,58
		$H + V$	6,27	12,57	18,86
13.4–5	30	H	9,00	17,99	27,00
		V	4,82	9,64	14,46
		$H + V$	7,44	14,87	22,31
13.4–6	30	H	16,59	33,19	49,78
		V	12,99	25,98	38,97
		$H + V$	15,50	31,00	46,51

Tablica 13.4–9. Dopuštene vrijednosti dodirnog napona za uzemljivače transformatorskih stanica u ovisnosti o trajanju zemljospoja.

Postrojenja, objekti	Trajanje kvara, s	Dopušteni napon	
		koraka U_k, V	dodira U_d, V
neograđeno	0,25	120	110
	0,5	85	80
	> 1	65	65
ograđeno	0,25	250	240
	0,5	160	160
	> 1	125	125

U tablici 13.4–9 prikazane su najveće dopuštene vrijednosti dodirnog napona U_d i napona koraka U_k za neka karakteristična vremena trajanja kvara za ograđene i neograđene objekte. Usporedbom se vidi da su stvarne vrijednosti dodirnog napona za uzemljivače transformatorskih stanica (tablica 13.4–7) mnogo manje od dopuštenih vrijednosti (tablica 13.4–9). Isto se može zaljučiti i za napon koraka za sve analizirane uzemljivače, tablice od 13.4–7 do 13.4–9.

13.4.3. Napuci za projektiranje i održavanje uzemljivača na posebnim objektima

Analiza dobivenih rezultata pokazuje da okomiti elementi bitno ne smanjuju otpor uzemljenja promatranih uzemljivača. Okomiti elementi utječu na smanjenje otpora uzemljenja najviše do 20 %. Za dodirni napon smanjenje je i do 40 %, a za napon koraka najviše oko 30 %. Međutim, ako se ima u vidu opseg realnih vrijednosti otpornosti tla, najveće dopuštene vrijednosti struja jednostrukog zemljospoja i predviđena vremena trajanja kvara, vidi se da su stvarni dodirni naponi i napon koraka i za konfiguracije bez uspravnih elemenata mnogo manji od dopuštenih vrijednosti [L1].

Okomiti elementi, nasuprot tome, u znatnoj mjeri otežavaju i poskupljuju gradnju uzemljivača. Budući da napravljene analize pokazuju da se sa sličnim konfiguracijama uzemljivača, ali bez okomitih elemenata, dobivaju zadovoljavajuće karakteristike uzemljivača, primjena okomitih elemenata u tim slučajevima nije opravdana.

Analiza također pokazuje da su postojeći uzemljivači predimenzionirani, posebno uzemljivači transformatorskih stanica 35 kV/6 kV.

Literatura

[L1] Heppe, J.: *Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode Alloing, Non-Uniform Current Distribution*, IEE Trans on Pas, Vol. PAS-98, No.6, Nov/Dec 1979., pp 1978–1989.

[L2] Muftić, Dž.: *Zaštitno uzemljenje u zračnoj mreži 10(20)kV*, Dalekovod, Zagreb, 1979.

[L3] Lakota, J.: *Uzemljivači vodova 35 kV za sva zemljišta u mreži s izoliranom nultočkom ili kompenziranoj mreži, te 110 i 220 kV vodova u kruto uzemljenoj mreži za nenaseljena zemljišta*, Dalekovod, Zagreb, 1980.

14. UPORABA METALNOG PLAŠTA KABELA ZA OSTVARIVANJE REDUKCIJSKOG FAKTORA UZEMLJENJA I KAO UZEMLJIVAČA KOD IPO KABELA

Dugo vremena dominirali su kabeli s izolacijom od impregniranog papira i olovnim plaštem (IPO kabeli) u kabelskim mrežama visokog napona svih naponskih razina. Ti kabeli iznad olovnog plašta imaju čelične trake za mehaničku zaštitu preko koje je sloj od impregnirane jute za zaštitu od korozije, te nose oznaku IPO-13, IPO-10, IPO-14, IPZO-10, IPZO-13 i IPZO-14, itd..

Ti kabeli (a koje nazivamo i klasični kabeli) s aspekta problematike uzemljenja imaju dva dobra svojstva:

- Dobru vodljivost metalnog plašta kabela, a posebno olovnog omotača koji omogućuje odvođenje dijela struje zemljospoja iz transformatorske stanice u kojoj je zemljospoj u druge transformatorske stanice, čime se smanjuje struja zemljospoja kroz promatrani uzemljivač, a time i potencijal uzemljivača, te dodirni napon i napon koraka. Ta učinkovitost metalnog plašta kabela definira se s redukcijskim faktorom kabela r_k, koji se izračunava iz odnosa otpora plašta kabela prema ukupnom otporu strujnih krugova pri zemljospoju.
- Olovni plašt kabela izvrstan je uzemljivač, te povoljno doprinosi u smanjenju ukupnog otpora uzemljenja promatrane transformatorske stanice pri zemljospoju, podrazumijevajući da je metalni plašt kabela spojen na masu, tj. na sustav uzemljenja, a to je propisano i ispravno rješenje.

Danas se u srednjonaponskim mrežama napona 6, 10, 20 i 35 kV pretežito koriste jednožilni kabeli s izolacijom od umreženog polietilena tip: XHE 49, XHE 49-A, i PVC izolacijom XHP 48, XHP 48-A, koji u slojevima izolacije kabela imaju bakarne

vodiče presjeka od 16 do 35 mm^2 koji su označeni kao ekran ili električna zaštita. Također se katkad koriste i kabeli XHP 81 i XHP 81-A koji pored električne zaštite (ekrana) imaju i omot od dvije čelične trake.

Oznake tih kabela imaju značenje, prema normi HRN.N.C0.006 :

X oznaka za izolaciju posljednjeg izolacijskog sloja od polietilena
H oznaka sloja izolacije od plastike na slojevima oko vodiča
P oznaka za vanjski PVC plašt, odnosno E za izolaciju od polietilena.

Brojčane oznake 48 i 49 označuju konstrukciju ekrana ili električne zaštite ispod vanjskog plašta od termoplastične mase, koja je postavljena oko svake žile posebno u vidu omota ili oplata od metalnih žica, odnosno omota od metalnih traka. Slovna oznaka A označava aluminijski vodič.

Klasični kabeli IPO imaju prema navedenoj normi značenje:

IP impregnirani papir
O olovni plašt
Z električnu zaštitu
13 mehanička zaštita izvedena omotom od dvije čelične trake, zaštita od korozije, vlakna impregnirana kompaktnom masom,
10 mehanička zaštita, omot od dvije čelične trake i zaštita od korozije premaz masom
14 isto kao za 10 i 13 i zaštita od korozije s plaštem PVC mase.

Olovni plašt kabela ili pak postavljanje trakastog uzemljivača pored navedenih jednožilnih kabela predstavlja dobar prigušivač potencijala, što je posebno značajno pri rješavanju problema pojave iznošenja visokih potencijala iz postrojenja s izravnim uzemljenjem neutralne točke transformatora mreža 110, 220 i 380 kV. Zbog velike struje zemljospoja i visokog potencijala uzemljivača tih transformatorskih stanica.

14.1. REDUKCIJSKI FAKTORI KABELA

Redukcijski faktor r_K kabela izračunava se iz omjera otpora plašta kabela i ukupnih otpora strujnog kruga pri zemljospoju po formuli:

$$r_K = \frac{R_{pl}}{\left(R_{pl} + R_{ZK} + R_{Z1} + R_{Z2}\right) + j\left(X_{pl} + X_Z\right)} \qquad (14.1\text{–}1)$$

gdje je:

R_{pl} ukupni djelatni otpor metalnog plašta kabela, Ω

R_{ZK} otpor uzemljenja plašta kabela i koji je samo kod kabela IPO recimo IPO-13, čija je jedinična vrijednost $r_{ZK} \approx 0{,}05$ Ω/km, te je $R_{ZK} = r_K \cdot l$, Ω

R_{Z1} i R_{Z2} otpori uzemljenja transformatorske stanice na koju je priključen promatrani kabel (R_{Z1}) i ostalih uzemljivača na prvoj transformatorskoj stanici na koju je spojen kabel (R_{Z2}), Ω

X_Z reaktancija povratnog puta kroz zemlju do transformatorske stanice na koju je priključen kabel bez utjecaja armature kabela, Ω
X_{pl} jedinična ili podužna reaktancija zbog utjecaja armature kabela, Ω/km
l duljina kabela, km.

Reaktancija petlje, metalni plašt kabela, povratni put kroz zemlju, sastoji se od reaktancije armature kabela X_{pl} i reaktancije povratnog puta kroz zemlju bez utjecaja armature kabela X_Z, te je ukupna reaktancija $X = X_{pl} + X_Z$ koja se obično navodi kao jedinična Ω/km i često se naziva podužna reaktancija, jer je po dužini kabela i povratnog puta struje kroz zemlju.

Reaktanciju zbog utjecaja armature kabela izračunavamo po formuli:

$$X_{pl} = 0{,}75\mu_{\mathrm{Fe}} \frac{n \cdot d_T \cdot 10^2}{D_S}, \quad \frac{\Omega}{\mathrm{km}} \tag{14.1–2}$$

I reaktancija povratnog puta struje kroz zemlju, bez utjecaja armature kabela, zamišljen kao fiktivni vodič promjera De:

$$X_Z = 0{,}145 \log \frac{2De}{D} + 0{,}016\mu_{pl} \tag{14.1–3}$$

$$De = 658\sqrt{\frac{\rho_z}{f}} \tag{14.1–4}$$

gdje je:

D_S srednji promjer armature plašta kabela, m
D vanjski promjer ekrana (električne zaštite) kabela, m
μ_{Fe} reaktivna permeabilnost armature kabela
μ_{pl} reaktivna permeabilnost ekrana kabela
n broj traka armature kabela
d_T ekvivalentna dubina povratnog puta struje kroz zemlju ili pak promjer fiktivnog vodiča, m
f frekvencija izmjenične struje, Hz
ρ_z otpornost tla, Ωm.

Za izmjeničnu struju frekvencije 50 Hz i otpornost tla od 100 Ωm dubina je puta struje kroz zemlju:

$$De = 658\sqrt{\frac{100}{50}} = 930 \text{ m}$$

Reaktancija X ovisi o jačini struje kroz plašt kabela, koja utječe na iznos relativne permeabilnosti armature kabela, a time i na reaktanciju armature kabela X_{pl}.

Proračun redukcijskog faktora kabela r_K nije jednostavan i posebno je delikatno određivanje reaktancije armature X_{pl} zbog nelinearne ovisnosti relativne permeabilnosti plašta kabela od struje zemljospoja. S porastom struje kroz plašt kabela povećava se reaktancija armature do zasićenja armature te povoljno utječe na smanjenje redukcijskog faktora. Daljnjim porastom struje kroz armaturu kabela ne povećava se

reaktancija, te se povećava redukcijski faktor kabela, što je nepovoljno. Razumljivo je da se to odnosi na kabele koji imaju željeznu armaturu, kao što su to kabeli IPO-13, XHP 81 i dr.

Ukupni djelatni otpor metalnog plašta kabela, ekrana (električne zaštite) koji je obično od bakrenih vodiča ili pak bakrenih vodiča i čelične armature zajedno:

$$R_{pl} = r_{pl} \cdot l \tag{14.1–5}$$

$$r_{pl} = \frac{\rho_{pl}}{S_{pl}}$$

Jedinični djelatni otpor plašta kabela r_{pl}, metalne armature i ekrana zajedno po km. U nedostatku podataka o presjeku S i otpornosti željezne armature uzima se nepovoljnija vrijednost te se izračuna samo za ekran, za koji se navode podaci proizvođača kabela, te je:

$$r_{pl} = \frac{\rho_e}{S_e} \tag{14.1–6}$$

gdje je:

l duljina kabela, m

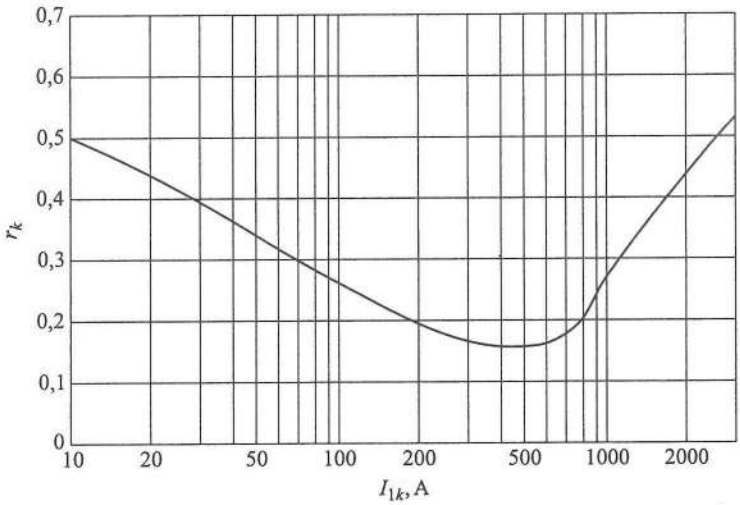
ρ_e otpornost vodiča ekrana i za bakrene vodiče, kao što je to najčešće slučaj $\rho_{pl} = 0{,}0175\ \Omega\text{m/mm}^2$, i u formuli (14.1–5) je u Ωm,

S_e presjek bakrenog vodiča ekrana, koji za srednjonaponske jednožilne kabele XHP 48, XHP 49 iznosi 16, 25 ili 35 mm^2, m^2

ρ_{pl} otpornost plašta kabela, Ωm,

S_{pl} presjek plašta kabela, m^2,

r_{pl} jedinični otpor plašta kabela, Ω/m.

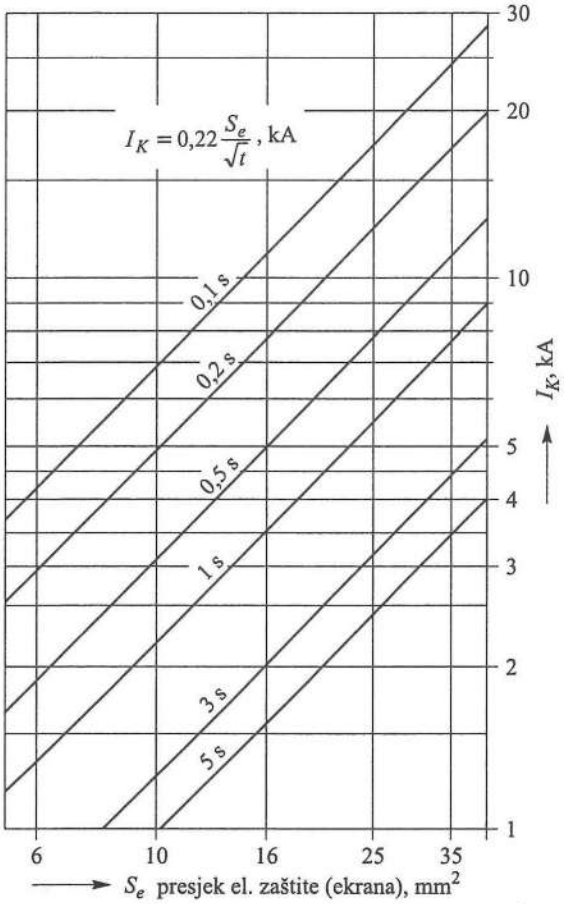


Sl. 14.1–1. Ovisnost redukcijskog faktora kabela IPO-13, 3 × 95 mm^2 o struji dozemnog kratkog spoja I_{1k}.

Na slici 14.1-1 navedena je krivulja ovisnosti redukcijskog faktora kabela r_K o struji zemljospoja koja teče kroz plašt kabela za kabel IPO-13, 3 × 95 mm^2, U_n = 10 kV.

Na slici 14.1–2 prikazana je ovisnost struje kratkog spoja kroz plašt (ekran) kabela I_k od presjeka elek. zaštite (ekrana) i za vrijeme djelovanja zemljospojne zaštite od 0,1 s do 5 s, prema podacima proizvođača kabela ELKA, Zagreb.

Iz slike 14.1–1 vidimo vrlo povoljan redukcijski faktor kabela $r_K < 0{,}2$ za struje zemljospoja vrijednosti od 200 A do 800 A. To znači da ako je struja zemljospoja promatranog uzemljivača 1000 A, a redukcijski faktor kabela $r_K = 0{,}2$ čiji su metalni plašt i ekran spojeni na sustav uzemljenja kroz promatrani kabel teći će struja od 800 A, a kroz promatrani uzemljivač 200 A. To je izuzetno povoljno za napon koraka i dodirni napon za taj uzemljivač.



Sl. 14.1–2. Ovisnost struje kratkog spoja o presjeku električne zaštite (S_e) za različito vrijeme trajanja kratkog spoja, za kabele XHE 48 i XHP 48 10 i 20 kV.

Uzemljenje neutralne točke 10 kV i 20 kV mreže preko djelatnog otpora s ograničenjem struje zemljospoja na 150 A i 300 A primjenjuju se danas kao uobičajeno rješenje, što je povoljno glede redukcijskog faktora kabela tipa IPO-13.

Kabeli sa sintetičkom izolacijom tipa XHP 48, XHE 49 u plaštu kabela nemaju čeličnu armaturu, već samo bakrene vodiče presjeka 16, 25 ili 35 mm^2 u ekranu (električnoj zaštiti) koja se nalazi u plaštu kabela, te je manji redukcijski faktor kabela r_K i prema [61] preporuka je za redukcijski faktor kabela uzeti r_K od 0,5...0,7. To vrijedi i za kabel XHP 81 koji ima armaturu od dvije čelične trake, ekran od bakrenih vodiča i PVC plašt preko armature.

Kod izravnog uzemljenja neutralne točke transformatorske stanice 110/10 kV ili 110/20 kV gdje su velike struje zemljospoja (preko 10 kA) pri malom broju kabela 10(20) kV na pojedinim odvodima, za kabele s metalnom armaturom u plaštu kabela može se pojaviti određeno zasićenje i pogoršanje (povećanje) redukcijskog faktora pojeding kabela, a to treba temeljito razmotriti.

14.2. PRIMJENA METALNOG PLAŠTA KABELA KAO UZEMLJIVAČA

Kabeli s vodljivim (prema zemlji) metalnim plaštem, npr. IPO kabeli, mogu poslužiti i kao dobri uzemljivači. Kod njih dolazi do postupnog prodiranja vlage kroz slojeve impregnirane jute i papira, te se uspostavlja vodljiva veza olovnog plašta i zemlje.

Proračun otpora uzemljenja metalnog plašta IPO kabela dosta je složen te se katkad koristi analogijom s trakastim uzemljivačem.

Točan proračun efekta plašta kabela kao uzemljivača dobiva se iz nadomjesne sheme kabelskog voda između TS1 110/10 kV i TS2 10/0,4 kV prema slici 14.2–1.

Impedanciju ili kako se često naziva podužnu impedanciju $\overline{Z}$ (jer se odnosi na određenu duljinu kabela) i poprečnu admitanciju plašta kabela izračunavamo po formulama:

$$\overline{Z} = r_{pl} + jx = r_{pl} + j\left(x_{pl} + x_z\right), \quad \frac{\Omega}{\text{km}} \tag{14.2–1}$$

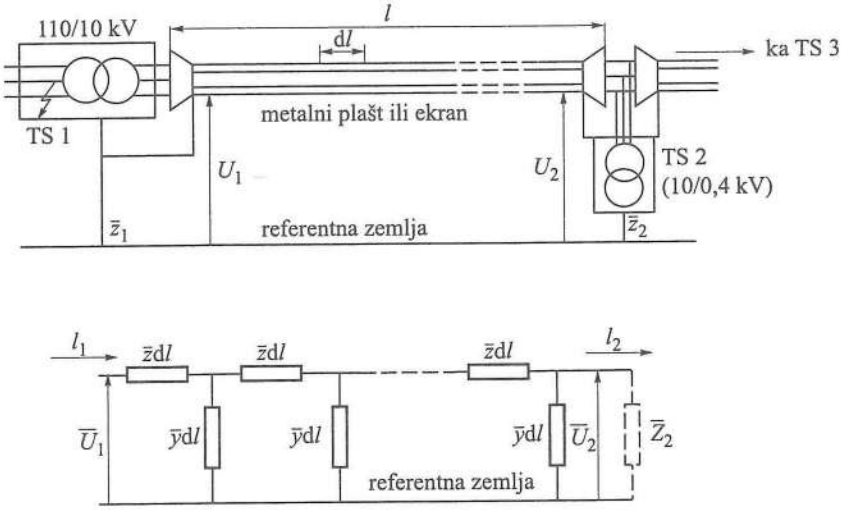
$$\overline{Y} \approx g \approx \frac{\pi}{\rho_z} \cdot \frac{10^3}{\ln \frac{l}{\sqrt{hD}}}, \quad \frac{\text{S}}{\text{km}} \tag{14.2–2}$$

gdje je:

- g vodljivost vodoravno položenoga trakastog uzemljivača, S/km
- h dubina ukopa kabela, m
- D vanjski promjer metalnog plašta kabela, m
- l duljina kabela, km
- ρ_z otpornost tla, Ωm

x_z reaktancija povratnog puta struje kroz zemlju, bez utjecaja armature kabela, Ω/km

x_{pl} reaktancija armature kabela, Ω/km.



Sl. 14.2–1. Metalni plašt kao uzemljivač i iznošenje potencijala.

Ako se s U_1 i I_1 označi napon i struja metalnog plašta kabela u TS1, a s U_2 i I_2 napon i struja u TS2, opće su jednadžbe vodova za slučaj zemljospoja u TS1:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}_2 \cdot ch\overline{\gamma}l + \overline{I}_2\overline{Z} \cdot sh\overline{\gamma}l \tag{14.2–3}$$

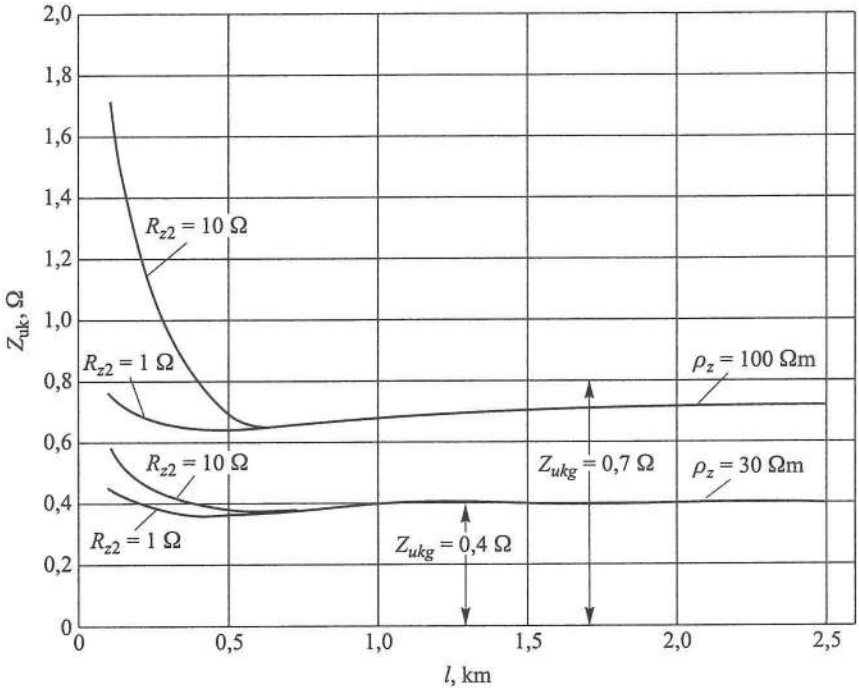
$$\overline{I}_2 = \overline{I}_2 \cdot ch\overline{\gamma}l + \frac{U_2}{\overline{Z}_e}\overline{I}_2\overline{Z} \cdot sh\overline{\gamma}l \tag{14.2–4}$$

U formulama (14.2–3) i (14.2–4) $\overline{\gamma}$ je koeficijent prostiranja, a $\overline{Z}_c$ je karakteristična impedancija metalnog plašta kabela, te je:

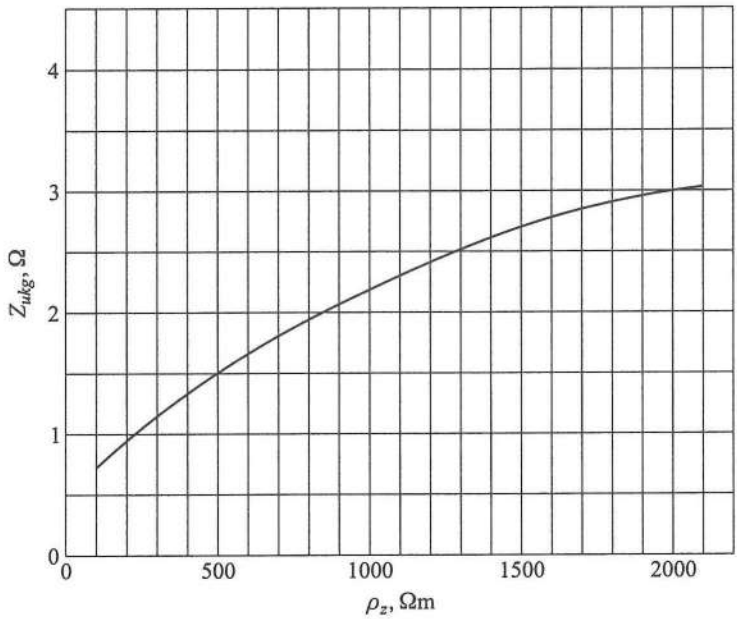
$$\overline{Y} = \sqrt{\overline{Z}_\gamma}, \quad \overline{Z}_c\sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} \tag{14.2–5}$$

Ukupna impedancija uzemljenja metalnog plašta kabela $\overline{Z}_{uk}$ razumijevajući je kao otpor uzemljenja dobiva se iz (14.2–3) i (14.2–4) uvrštavanjem $U_2 = Z_2 \cdot I_2$. $\overline{Z}_2$ je ukupna impedancija uzemljenja svih uzemljivača spojenih za TS2, te je:

$$\overline{Z}_{uk} = \frac{\overline{U}_1}{\overline{I}_1} = \overline{Z}_2 \cdot \frac{ch\overline{\gamma}l + \left(\dfrac{\overline{Z}_c}{\overline{Z}_2}\right) \cdot sh\overline{\gamma}l}{ch\overline{\gamma}l + \left(\dfrac{\overline{Z}_2}{\overline{Z}_c}\right) \cdot sh\overline{\gamma}} \tag{14.2–6}$$



Sl. 14.2–2. Ovisnost impedancije uzemljenja kabela o duljini.



Sl. 14.2–3. Ovisnost impedancije uzemljenja zemlje dugog kabela o otpornosti zemlje.

Zamjenjujući hiperbolične funkcije eksponencijalnim može se uzeti da je pri nekoj dovoljno velikoj duljini l kabela ispunjen uvjet:

$$ch\overline{\gamma}l \approx sh\overline{\gamma}l \approx \frac{e^{\overline{\gamma}l}}{2} \tag{14.2–7}$$

Uvrštavanjem (14.2–7) u (14.2–6) dobiva se granična impedanciju uzemljenja kabela:

$$\overline{Z}_{ukg} \approx \overline{Z}_c \approx \sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} \tag{14.2–8}$$

Ovisnost ukupne impedancije uzemljenja metalnog plašta kabela $\overline{Z}_{uk}$ o duljini kabela prema formuli (14.2–5) za kabel IPO-13, 3 × 95 mm^2 prikazana je na sl. 14.2–2. Ovisnost granične impedancije uzemljenja o otpornosti tla prikazana je na slici 14.2–3.

14.3. PRIMJERI UPORABE METALNOG PLAŠTA KABELA KAO UZEMLJIVAČA

Činjenica je da naši projektanti ne uzimaju u obzir IPO kabel kao uzemljivač. Da je efekt zaista važan pokazat ćemo na primjeru dimenzioniranja uzemljenja transformatorske stanice TS 10/0,4 kV. Ukupni otpor uzemljenja tog postrojenja treba biti:

$$R_{uz} \leq \frac{U_d}{r_K \cdot I_{1k}} \tag{14.3–1}$$

gdje je:

U_d dopušteni dodirni napon

r_K redukcijski faktor kabela

I_{1k} struja zemljospoja (npr. I_{1k} = 300 A u uzemljenoj 10 kV ili 20 kV mreži preko otpora), pri čemu s oznakom I_{1k} podrazumijevamo kako se to često kaže i struju jednopolnog kratkog spoja, jer je zemljospoj istovremeno i jednopolni kratki spoj.

Ako pretpostavimo da će u niskonaponskoj mreži biti primijenjeno nulovanje i da će zemljospoj biti isključen nakon 1 s, iz krivulje opasnosti a (v. sliku 13.1–1), dobiva se U_d = 65 V. Ako je priključak na postrojenje izveden kabelom IPO-13, 10 kV bit će r_K = 0,2 te je otpor uzemljenja ograničen na:

$$R_{uz} \leq \frac{65}{0{,}2 \cdot 300} \leq 1{,}08 \approx 1\,\Omega$$

Na osnovi krivulje $Z_{ukg} = f(\rho_z)$ na slici 14.2–3 vidimo da će otpor uzemljenja od 1 Ω osigurati priključni kabel od 10 kV ako se položi u tlo otpornosti ρ_z < 200 Ωm, a

to je praktično na većoj površini tla u Hrvatskoj (v. sliku 2.2–2). Na osnovi gornjega jednostavnog računa zaključujemo da su u tom postrojenju od 10/ /0,4 kV ispunjeni uvjeti bezopasnosti ako je mreža od 10 kV izvedena klasičnim kabelima. Ako tom otporu uzemljenja dodamo uzemljivač postrojenja od 10/0,4 kV, onda će zasigurno biti ispunjeni uvjeti glede opasnog dodirnog napona i ograničenja otpora uzemljenja. Taj otpor uzemljenja može imati i veliku vrijednost, recimo 10 Ω te će opet biti zadovoljeni sigurnosni uvjeti, jer je ukupni otpor uzemljenja za dva paralelna uzemljivača otpora od 1 i 10 Ω u iznosu 0,91 Ω.

Nasuprot tim razmatranjima, projektanti obično predviđaju da zahtijevani otpor od 1 Ω postignu samo uzemljivačem postrojenja, što je neekonomično i često teško izvodljivo zbog malih dimenzija postrojenja od 10/0,4 kV i nedovoljnog prostora za uzemljivač, te se sve svodi na skupa i neracionalna rješenja.

Ako je na neko postrojenje priključeno više srednjonaponskih IPO kabela, njihov udio kao uzemljivača postrojenja bit će veći jer će se smanjivati ukupni otpor uzemljenja i iznosit će:

$$R_{ukz} = \frac{k' R_{uk1}}{n} \tag{14.3–2}$$

gdje je

n broj kabela

R_{uk1} otpor uzemljenja jednog kabela

k' faktor kojim se određuje međusobni utjecaj kabela kao uzemljivača ($k' > 1$).

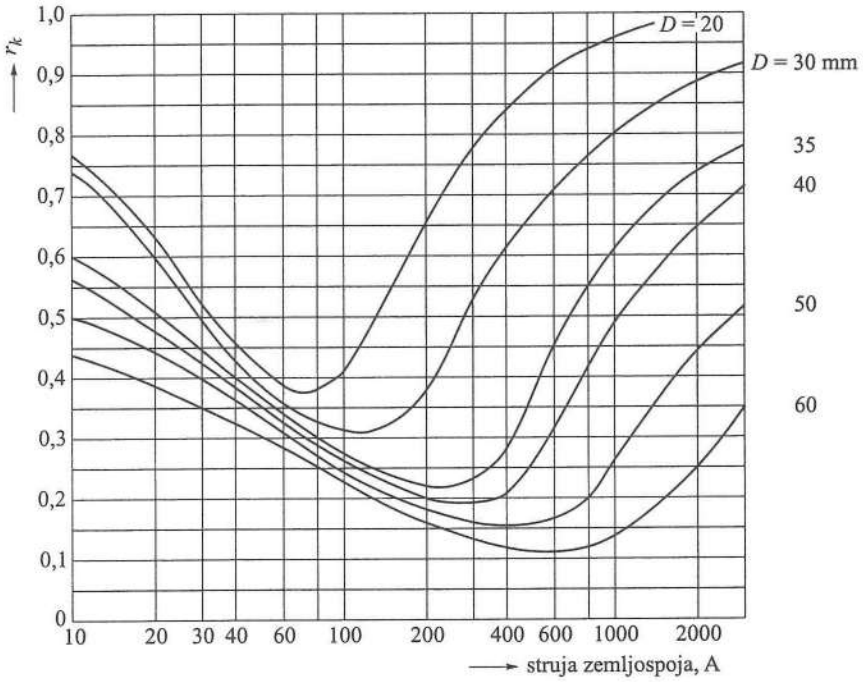
Redukcijski faktor r_k određenih kabela nazivnog napona 10 kV za različite promjere plašta kabela D u ovisnosti od struje zemljospoja koja teče plaštom kabela prikazana je na slikama 14.3–1 i 14.3–2.

Faktor k' teško je odrediti jer ovisi o načinu i pravcu polaganja kabela u odnosu na postrojenja, a njegovo točnije određivanje za različite slučajeve nije moguće bez pomoći računala. Ipak, za postrojenja 10/0,4 kV koja se priključuju po načelu »ulaz – izlaz« ($n = 2$) može se uzeti da je $k' = 1$ do 1,5. Za velika razvodna postrojenja (npr. 110/10 kV), pod pretpostavkom da se postrojenje nalazi približno u središtu potrošnje, mogli bismo uzeti da je $R_{uk} = 0{,}25 \times R_{uk1}$. To bi bila najmanja vrijednost uzemljenja koja potječe od cjelokupne kabelske mreže. Ona je veoma mala, reda 0,2 Ω i manje. To omogućava primjenu zaštite od opasnog dodirnog napona nulovanjem u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača, jer mali otpor uzemljenja onemogućuje pojavu opasnih dodirnih napona i u 10(20) kV mreži uzemljenoj preko otpora s ograničenjem struje zemljospoja na 300 A.

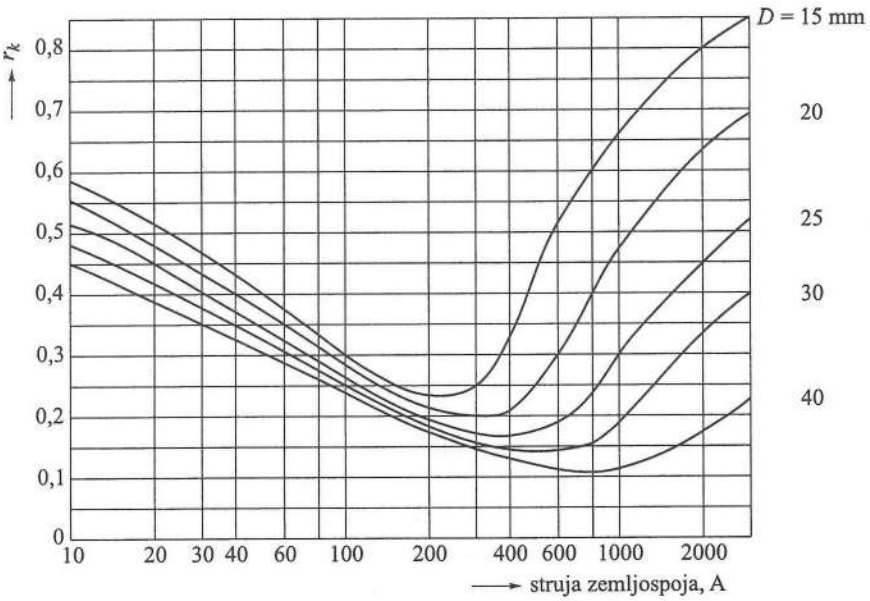
Na kraju treba reći da postizanje malih otpora uzemljenja zbog prisutnosti IPO srednjonaponskih kabela kao uzemljivača omogućava primjenu samo PVC niskonaponskog kabela s provodnim plaštem PP 41 – ASJ ili sličnim.

Usvojena je podužna impedancija olovnog plašta $\overline{Z} = (0{,}7 + j \times 2)$ (Ω/km), što odgovara u svim primjerima gdje je struja dozemnoga kratkog spoja manja od 500 A.

Na sl. 14.2–2 dane su krivulje $Z_{uk} = f(l)$ za $\rho_z = 30$ Ωm i 100 Ωm, i za otpore uzemljenja u TS2 $Z_2 = R_2 = 1$ Ω i 10 Ω.



Sl. 14.3–1. Redukcijski faktor r_k kabela nazivnog napona od 10 kV tipa IPO-10, IPO-13 i IPO-14 vanjskog promjera D.



Sl. 14.3–2. Redukcijski faktor r_k kabela nazivnog napona od 10 kV tipa IPZO-10, IPZO-13 i IPZO-14 vanjskog promjera D.

Iz navedenih podataka vidimo da je klasičan kabel odličan uzemljivač. Doduše, otpor uzemljenja kabela veći je kod malih duljina, a ustaljuje se na vrijednosti Z_{ukg}, bez obzira na veličinu otpora uzemljenja u TS2. Za praktične proračune može se uzeti uvijek Z_{ukg} kada je promatrani kabel dio razgranate kabelske mreže, te su metalni plaštevi susjednih kabela međusobno vezani bez obzira na pogonsko stanje mreže.

Na sl. 14.2–3 prikazana je funkcija $Z_{ukg} = f(\rho_z)$ za kabel IPO-13, 3 × 95 mm^2. Vidi se da se i pri relativno visokom ρ_z taj kabel ponaša kao dobar uzemljivač.

14.4. PROBLEM IZNOŠENJA POTENCIJALA IZ POSTROJENJA

Pri sve većoj primjeni transformacije 110/10(20) kV pojavljuje se problem iznošenja potencijala preko metalnih plašteva i ekrana kabela od 10(20) kV, što može izazvati previsoke napone dodira u postrojenjima 10(20)/0,4 kV, niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača.

Razmotrimo shemu mreže predstavljenu na slici 14.2–1. U primjeru jednopolnoga kratkog spoja (zemljospoja) na strani 110 kV na uzemljenju TS1 pojavit će se napon:

$$U_1 = r_K \cdot I_{1k} \cdot R_{z1} \tag{14.4–1}$$

iz čega se vidi da će napon U_1 biti manji ako je manji ukupan otpor uzemljenja TS1 R_{z1}, redukcijski faktor priključnog voda 110 kV, $r_k < 1$ i struja dozemnog kratkog spoja na 110 kV (I_{1k}).

Razmotrimo problematiku iznošenja potencijala iz transformatorske stanice 110/ /10 kV.

Smanjenje otpora uzemljenja R_{z1} postiže se pogodnim izvođenjem samog uzemljivača postrojenja od 110/10 kV i primjenom klasičnih IPO kabela od 10 kV, odnosno kabela s plastičnom izolacijom pored kojih je položen trakasti uzemljivač. Efekt tih kabela kao uzemljivača tako je važan da uvijek preporučujemo primjenu tih kabela za vezu između postrojenja od 110/10 kV i prvih postrojenja od 10/0,4 kV, bez obzira na to izvodi li se ostali dio mreže od 10 kV s kabelima koji nemaju provodni plašt.

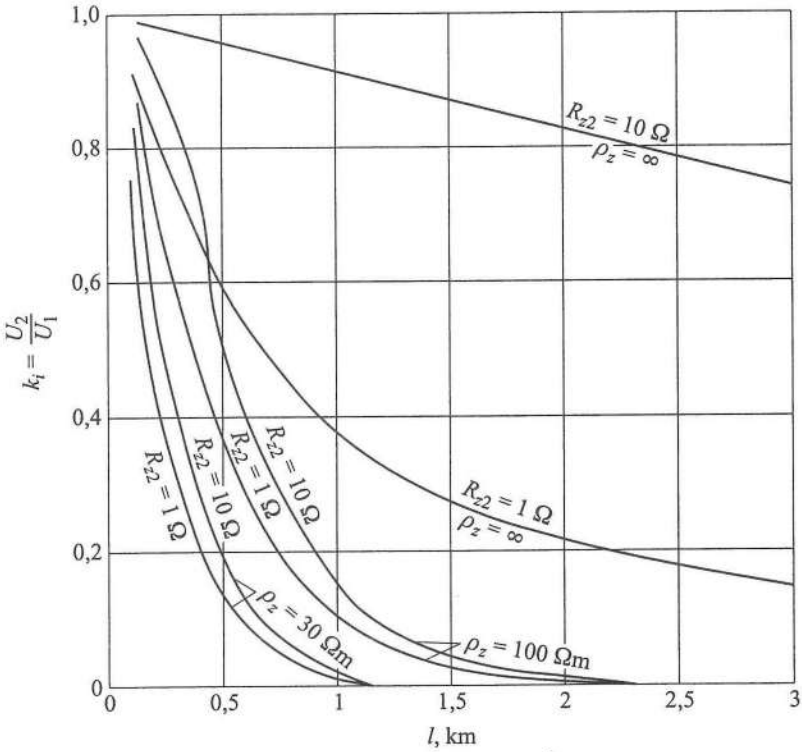
Preciznih podataka o redukcijskom faktoru r_K voda 110 kV (kabelskog ili nadzemnog sa zemljovodnim užetom) nema kada je riječ o velikim strujama dozemnih kratkih spojeva.

Ipak, u sadašnjim uvjetima praktično je nemoguće postići zadovoljavajuće smanjenje napona U_1 ako bi se zadržale sadašnje jako visoke vrijednosti struja dozemnih kratkih spojeva, pa smatramo da bi odmah trebalo poduzeti određene mjere da se te struje limitiraju. Dolazi u obzir smanjenje broja uzemljenih neutralnih točaka 110 kV, promjena konfiguracije i načina rada mreže 110 kV (ta mreža ne mora uvijek raditi kao petljasta), a u posebno kritičnim situacijama treba razmotriti mogućnost ograničenja struje I_{1k} ubacivanjem posebnih impedancija. Koliki je utjecaj pojedinih mjera za smanjenje struje I_{1k} posebno se izučava.

Kada se na uzemljenju TS 110/10 kV pojavi napon U_1, on se preko plašta ili ekrana kabela ili trakastih uzemljivača položenih pored kabela prenosi u TS 10/0,4 kV, gdje ima vrijednost U_2. Odnos $k_i = U_2/U_1$ nazivamo faktorom izlazećeg potencijala i dobiva se iz relacije (14.3–3):

$$k_i = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\left|ch\bar{\gamma}l + (\bar{Z}_c / \bar{Z}_2)\cdot sh\bar{\gamma}l\right|} \qquad (14.4\text{–}2)$$

Na slici 14.4–1. dane su krivulje faktora izlazećeg potencijala k_i u ovisnosti o duljini kabela a za kabel IPO-13, 3 × 95 mm^2 za $\rho_z = 30$, 100 i ∞ Ωm te za otpore uzemljenja R_{z2} od 1 i 10 Ω. Taj dijagram može se upotrijebiti za procjenu faktora izlazećeg potencijala k_i pri polaganju trakastih uzemljivača pored plastičnih kabela (XHP ili EHP) s tim što se zbog manjeg otpora uzemljenja ostvaruje povoljniji faktor k_i.



Sl. 14.4–1. Faktor izlazećeg potencijala $k_i = f(l)$ za $\rho_z = 30$, 100 i ∞ Ωm.

Vidi se da se u postrojenjima od 10/0,4 kV mogu očekivati relativno visoki naponi U_2 ako udaljenost od TS 110/10 kV nije velika. Posebno su nepovoljni uvjeti ako je kabel od 10 kV položen u tlo s velikom otpornošću uzemljenja, ili, što je isto, ako je kabel s PVC plaštem. Kako u Hrvatskoj otpornost tla, za najveću površinu, iznosi

od 50...200 Ωm, vidi se da je klasični IPO-13 kabel dobar prigušivač izlazećeg potencijala, pa se primjena tog kabela za vezu TS 110/10 kV s najbližim TS 10/0,4 kV preporučuje i iz tog razloga.

Radi sprečavanja iznošenja opasna potencijala pojedini projektanti i inspektori zahtijevaju ubacivanje izolacijskih umetaka (jednog ili više) na plaštu ekrana kabela. Takav je pristup pogrešan jer se gubi ekranizirajuće djelovanje kabela i odnosi se na telekomunikacijske kabele. Katkad se poseže za izolacijom plašta ekrana u odnosu na uzemljenje TS 10/0,4 kV. To rješenje također nije dobro, a suprotno je propisima [16 i 41] u kojima stoji da »metalne plašteve i armature kabela treba na oba kraja spojiti na masu tj. na sustav uzemljiti«.

Ubacivanje izolacijskih umetaka ili primjenu nekih sličnih prekidanja vodljive veze između uzemljenja u TS1 i TS2 trebalo bi svakako isključiti kao mjeru smanjenja opasnosti od izlazećeg potencijala, jer te mjere djeluju upravo suprotno.

Prije svega, povećava se otpor uzemljenja mreže kao cjeline, što dovodi do povećanja razine potencijala i dodirnog napona u oba postrojenja. Time se također znatno smanjuje ili potpuno otklanja efekt IPO kabela kao uzemljivača u oba postrojenja. Povećava se i redukcijski faktor kabela, što sve dalje otežava zadovoljavanje uvjeta bezopasnosti.

Ako opisane mjere za smanjenje razine napona U_1 u TS1 nisu dovoljno efikasne, a udaljenost između TS1 i TS2 je takva da se ne može očekivati zadovoljavajuće prigušenje napona, moraju se poduzeti dodatne mjere zaštite od previsokog napona dodira, a prije svega:

- svaki objekt (zgrada) koji se priključuje niskonaponskim kabelima na TS 10/0,4 kV koja je u blizini TS 110/10 kV, treba imati svoj uzemljivač (po mogućnosti temeljni), na kojem je strogo primijenjena mjera izjednačenja potencijala
- priključni niskonaponski kabeli trebaju biti s PVC plaštem
- kabelske priključne kutije i razvodni ormari trebaju biti od izolacijskog materijala (poliester).

Primjer 14A

Izračunaj reaktanciju X_Z petlje metalnog plašta kabela povratnog puta kroz zemlju bez utjecaja armature kabela i djelatni otpor Fe plašta kabela, za 6 kV kabel XHP 48, 1 × 400/25 mm^2. Promjer armature kabela (ekrana) D = 0,031 m, a presjek bakrenih vodiča ekrana je 25 mm^2, te je $\mu_{Fe} = 1$.

Po formuli (14.1–3) reaktancija je:

$$X_Z = 0{,}145 \log \frac{2De}{D} + 0{,}016\mu_{pl}$$

Po formuli (14.1–4) ekvivalentna dubina povratnog puta struje kroz zemlju za frekvenciju 50 Hz i ρ_z = 100 Ωm:

$$De = 658\sqrt{\frac{\rho_z}{f}} = 658\sqrt{\frac{100}{50}} = 930\ \text{m}$$

te je reaktancija X_Z:

$$X_Z = 0{,}145\log\frac{2\cdot 930}{0{,}031} + 0{,}016\cdot 1 = 0{,}71\ \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$r_{pl} = \frac{\rho_e}{S_e} = \frac{0{,}0175}{25\cdot 10^6\cdot 10^3} = 0{,}755\ \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Literatura

[L1] Uljanov, S. A.: *Elektromagnetski prelazni procesi*, Energija, Moskva, 1970.

[L2] Milosavljević, B., Đorđević, N.: *Nulta impedancija kod kabela*, II. savjetovanje JUNAKO CIGRE o energetskim kabelima.

[L3] Kupfmuller, K.: *Einführung in die Theoretische Elektrotehnik*, Springer V., 1968.

[L4] Elektrotehnički fakultet Beograd: *Studija zaštite od opasnih napona u niskonaponskoj mreži*, Beograd, 1973.

[L5] Petersom, H. A.: *Transients in power systems*, New York, 1966.

15. DOPRINOS ARMIRANOBETONSKIH TEMELJA SMANJENJU OTPORA UZEMLJENJA STUPOVA

Do prije pedesetak godina vladalo je mišljenje da nije moguće zaštititi dalekovod od 110 kV i više od izravnih udara munje, a danas su gotovo svi ti dalekovodi izvedeni tako da su s velikom vjerojatnošću zaštićeni od atmosferskih pražnjenja i stvaranja sljedećih prenapona:

- elektromagnetske indukcije
- izravnog udara u fazne vodiče
- povratnog preskoka.

Elektromagnetska indukcija obično je bezopasna za dalekovode napona od 110 kV i više. Mali broj udara munje izravno pogađa fazne vodiče na propisno zaštićenom vodu. Povratni preskok najinteresantniji je i on se pojavljuje ako je razlika potencijala između konstrukcije stupa i faznog vodiča veća od podnosivog napona izolacije voda.

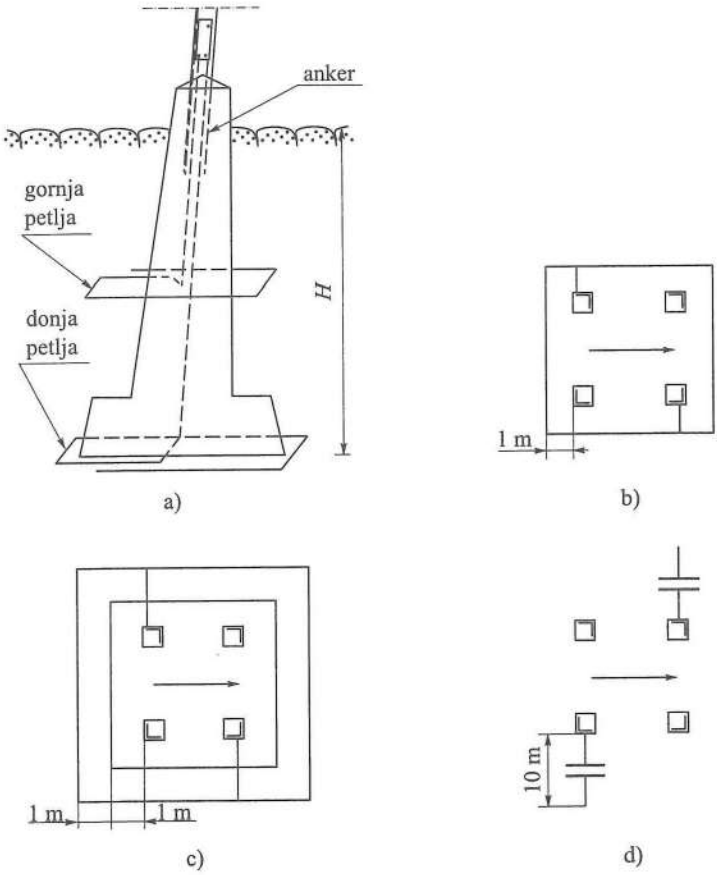
Statističkim i laboratorijskim istraživanjima došlo se do zaključka da je vjerojatnost udara munje u neki uzemljeni objekt to veća što je otpor uzemljenja manji [L11]. To se može objasniti procesom koji nastaje u posljednjoj fazi višestrukoga brzog uzastopnog pražnjenja naelektriziranog oblaka prema zemlji, kada se pojavljuje nekoliko usmjerenih munja različitog lokaliteta, a do najvećeg pražnjenja dolazi duž puta koji ima najnižu impedanciju. Ipak, to ne znači da treba graditi dalekovode s visokim vrijednostima otpora uzemljenja stupova, jer su oni, bez obzira na otpor uzemljenja, izloženi atmosferskim pražnjenjima, a dalekovodna konstrukcija to lakše rasipa struju groma u zemlju što je manji otpor uzemljenja. Tu činjenicu dokazuju i brojne studije i rekonstrukcije uzemljivača dalekovoda, nakon kojih je smanjen broj ispada dalekovoda iz pogona zbog atmosferskih pražnjenja.

Prema iskustvu [20] pri projektiranju uzemljivača naročito je važno uzeti u obzir doprinos armiranobetonskog temelja stupa za postizanje zadovoljavajućeg otpora rasprostiranja stupa.

15.1. REZULTATI MJERENJA

15.1.1. Eksperimentalni uzemljivači na dalekovodima

Tijekom 1984. i 1985. godine u BiH izgrađeni su dalekovodi od 110 kV Višegrad – Rudo, Bugojno – G. Vakuf, Jablanica – Prozor i Derventa – Gradačac. Na tim je dalekovodima odabrano 45 stupova koji su postavljeni na terenima različite otpornosti, od 10 i 15 Ωm pa sve do 3600 Ωm u gornjem sloju. Donji je sloj imao otpornost od 20 do 1500 Ωm.



Sl. 15.1–1. Shematski prikaz temeljne stope uzemljivača: a) tip A, b) tip D, c) tip D1, d) tip T.

Od promatranih 45 stupova, 6 je bilo s uzemljivačima tipa A, 2 s uzemljivačima tipa D, 1 s uzemljivačem tipa D1, 7 s uzemljivačem tipa T i 10 bez dodatnih uzemljivača. Detaljniji opis uzemljivača dan je u [L1, L2], a njihov shematski prikaz na slici 15.1–1.

Mjerna metoda provjerena je usporedbom rezultata mjerenja prije i nakon postavljanja zaštitnog užeta. Također je na određenom broju stupnih mjesta na kojima su bili postavljeni dodatni uzemljivači izvršeno mjerenje, a potom su dodani uzemljivači izvađeni. Uspoređivanjem jednih i drugih rezultata mjerenja ustanovljeno je da nije bilo znatnijih odstupanja, što praktično potvrđuje primijenjenu metodu [L2].

Rezultati mjerenja otpora temelja na promatranim stupnim mjestima tijekom trogodišnjeg razdoblja dani su u tablici 15.1–1. Iz tablice 15.1–1 vidi se da nakon tri godine od izlijevanja armiranobetonskih temelja, od ukupno 45 stupova čiji su temelji u terenu s veoma različitim vrijednostima otpornosti, 41 stup ima otpor uzemljenja ispod 10 Ω, a samo dva otpor iznad 25 Ω. U tablici 15.1–2. dani su rezultati mjerenja otpora uzemljivača, temelja i rezultantnih otpora. Iz te je tablice vidljivo da se otpori temelja ponašaju slično otporima dodanih uzemljivača, tj. ovise o klimatskim čimbenicima, te da su njihove vrijednosti i nakon tri godine od dana postavljanja u granicama koje zadovoljavaju uvjete uzemljenja.

Tablica 15.1–1. Promjena otpora uzemljenja R_z armiranobetonskih temelja stupova 110 kV u trogodišnjem razdoblju.

	Otpor uzemljenja temelja, Ω	Naziv dalekovoda				Ukupno
		Jablanica – Prozor	Višegrad – Rudo	Derventa – Gradačac	Bugojno – G. Vakuf	
1. mjerenje (1984./1985.)	2...5	3	1	9	1	14
	5...10	9	8	3	3	23
	10...15	4	–	–	1	5
	15...20	2	–	–	–	2
	20...25	1	–	–	–	1
	25...30	–	–	–	–	–
2. mjerenje (1986.)	2...5	3	3	–	1	7
	5...10	11	6	–	3	20
	10...15	2	–	–	1	3
	15...20	1	–	–	–	1
	20...25	1	–	–	–	1
	25...30	1	–	–	–	1
3. mjerenje (1987.)	2...5	2	2	6	1	11
	5...10	13	7	6	4	30
	10...15	1	–	–	–	1
	15...20	1	–	–	–	1
	20...25	–	–	–	–	–
	25...30	2	–	–	–	2
Ukupno stupova na kojima su izvršena mjerenja po dalekovodu		19	9	12	5	45

Tablica 15.1–2. Rezultati mjerenja otpora uzemljivača stupova u trogodišnjem razdoblju.

Naziv dalekovoda 110 kV	Tip uzemljivača	Broj uzemljivača	Omjer otpornosti dvoslojnog tla ρ_{zg}/ρ_{zd}*	Datum mjerenja	Otpor uzemljenja R_z, Ω			Udio otpora uzemljenja temelja u ukupnom otporu uzemljenja, %
					Samo temelj	Samo uzemljivač	Temelj i uzemljivač spojeni	
Višegrad – Rudo	D	1	70/140	11.07.1984.	9	17	9	65
				23.08.1984.	8,5	14	8	62
				12.06.1985.	8,5	10,5	7	55
				09.04.1986.	9,5	12	8,2	56
				28.09.1987.	8,5	17,2	7,4	67
	A	3	20…30/ 70…140	11.07.1984.	3,6…8,6	–	3,3…8,2	–
				23.08.1984.	5,3…9,4	–	3,8…9	–
				12.06.1985.	4,2…9,5	–	3,2…8,5	–
				09.04.1986.	4,1…10	3,7…21	9…9,2	47…68
				28.09.1987.	3,5…9	–	3…8	–
	T 2 × 10 m	2	280/340	11.07.1984.	4,5…8,5	23	7,3	73…75
				23.08.1984.	7,5…8	20	7,5	70…74
				12.06.1985.	7,5	18,5	6	71
				09.04.1986.	8,5	16…24	6,6…8,9	65…74
				28.09.1987.	7,7…9	13…20	7,6	59…72

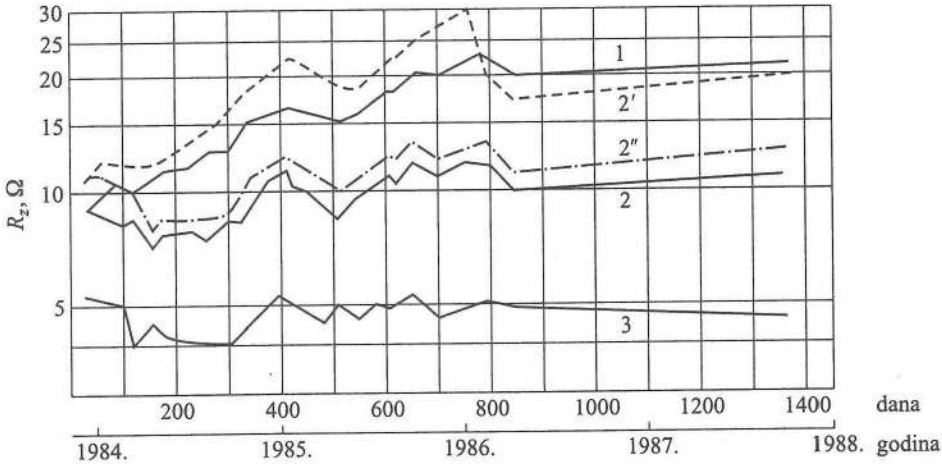
* ρ_{zg} otpornost gornjeg sloja, ρ_{zd} otpornost donjeg sloja

Tablica 15.1–2. Nastavak.

Naziv dalekovoda 110 kV	Tip uzemljivača	Broj uzemljivača	Omjer otpornosti dvoslojnog tla ρ_{zg}/ρ_{zd}	Datum mjerenja	Otpor uzemljenja R_z, Ω			Udio otpora uzemljenja temelja u ukupnom otporu uzemljenja, %
					Samo temelj	Samo uzemljivač	Temelj i uzemljivač spojeni	
Jablanica – Prozor	D	12	55…1010/ 25…600	27.03.1985. 13.05.1986. 07.11.1987.	4,6…23 4…32 4,5…40	6,8…25 3,3…33 3,8…40	3,5…22 3…27 2,8…30	54…60 45…50 45…53
	D_1	1	150/1500	27.03.1985. 13.05.1986. 07.11.1987.	20 22,5 25,5	14,5 21 22,5	12,5 17 17,5	42 48 46
	T 4 × 10 m	3	370…1010/ 140…185	27.03.1985. 13.05.1986. 07.11.1987.	12…13 9,3…12 8…13	– 10,8…15 11…15	– 7,6…8,9 6,3…10	– 53…55 54…58
Bugojno – G. Vakuf	D	1	65/100	24.04.1985. 12.05.1986. 05.11.1987.	5,6 5,6 5,6	– 3,8 4,8	– 3,4 3,5	– 40 46
	A	3	40…135/ 70…110	24.04.1985. 12.05.1986. 05.11.1987.	5,1…12,5 5,6…10 6,5…9	17,6 6,8…11 7,2…12	12,3 7,7…8,8 5,2…8,8	58 52…55 52…57
Gradačac – Derventa	D	7	10…280/ 15…75	10.11.1985. 08.11.1987.	2,6…5,4 4,5…5,6	2,2…8,5 2,2…7,5	1,9…5,2 1,7…5,4	46…61 33…54
	T 2 × 10 m	2	60…110/ 12…16	10.11.1985. 08.11.1987.	3,9…6,9 5,8…7,6	5,8…7,6 7…13	3,2…6,4 3,5…5	52…60 55…63

15.1.2. Eksperimentalni uzemljivači na posebnom poligonu

U terenu otpornosti od 180 Ωm do dubine 2 m i 30 Ωm na većoj dubini postavljena su tri eksperimentalna uzemljivača [L1, L2]: a) armiranobetonska stopa stupa 110 kV bez dodatnog uzemljivača, b) ista stopa s dvije uzemljivačke petlje i c) roštilj temelja, slika 15.1–1.a). Mjerenje otpora uzemljenja ta tri uzemljivača izvršeno je u razdoblju od veljače 1984. do listopada 1987. godine, a rezultati mjerenja dani su na slici 15.1–2. Sa slike je vidljivo da je otpor jedne armirano betonske stope stupa dostigao dvostruku početnu vrijednost za dvije godine (krivulja 1), a druge čak trostruku. Nakon toga je kod prve stope nastalo izvjesno kolebanje otpora, a kod druge oštar pad. U svakom slučaju, izmjerene vrijednosti otpora relativno su niske i podliježu promjenama u ovisnosti o klimatskim uvjetima.



1 temeljna stopa bez uzemljivača
2 temeljna stopa s uzemljivačem tipa A
2′ otpor same temeljne stope
2″ otpor samog uzemljivača A
3 metalni temelj tipa »roštilj«

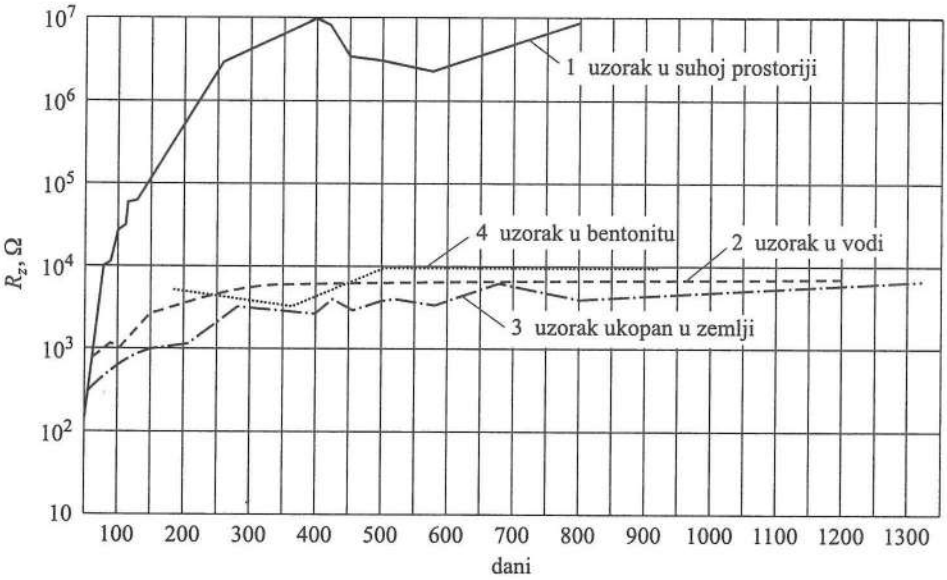
Sl. 15.1–2. Promjena otpora uzemljenja eksperimentalnih uzemljivača.

15.2. ISPITIVANJE PROMJENE OTPORA UZEMLJENJA BETONSKIH UZORAKA

O mogućnosti uporabe armirano betonskih konstrukcija za uzemljenje u literaturi se daju različita mišljenja. Dok neki autori preporučuju primjenu takvih uzemljivača, drugi su izričito protiv. Podaci o električnim karakteristikama betona koji se mogu naći u literaturi različiti su i često kontradiktorni, posebno kada se radi o promjeni karakteristika u dužem razdoblju. Da bi se otklonile dvojbe, pristupilo se ispitivanju promjene otpornosti betonskih uzoraka postavljenih u razne uvjete okoline

[L2]. Rezultati tih ispitivanja dani su na slici 15.2–1, a sa slike 15.2–1 vidljivo je sljedeće:

- Otpornost prostornog uzorka br. 1 koji se nalazi u suhoj prostoriji imala je porast u prvih 400 dana oko 1000 Ωm/dan. U sljedećih 350 dana prosječan porast iznosio je 310 Ωm/dan. Zaključeno je da mjerenje nema smisla, pa je uzorak potopljen u vodu. Nakon jednog dana izvršeno je mjerenje otpornosti uzorka i ustanovljeno je da se otpornost smanjila na vrijednost koju ima i uzorak stalno potopljen u vodu, tj. promjena otpornosti je reverzibilna i ovisi o vlažnosti okoline u kojoj se uzorak nalazi.
- Otpornost uzorka br. 2, koji je potopljen u vodu iz gradskog vodovoda (ρ_z = 25 Ωm) prvih 20 dana imala je porast od 2,2 Ωm/dan, do 100 dana od 2 Ωm/dan, od 100 do 300 dana od 0,7 Ωm/dan, od 300 do 600 dana od 0,5 Ωm/dan, a zatim je do 1250 dana zabilježen pad otpornosti od 0,047 Ωm/dan.
- Uzorak br. 3 zakopan je na dubinu od 0,7 m u zemlju otpornosti od 20 Ωm kada je njegova otpornost iznosila 20 Ωm. Nakon 500 dana otpornost uzorka bila je 250 Ωm, tj. prosječan porast po danu iznosio je 0,46 Ωm. U sljedećih 650 dana otpornost je porasla na 320 Ωm uz prosječan porast od 0,108 Ωm/dan.
- Uzorak br. 4 zakopan je u zemlju otpornosti od 750 Ωm i zasut suspenzijom bentonita. Provjera otpornosti tog uzorka izvršena je nakon 135, 460, 580 i 860 dana. Pri prvom mjerenju porast otpornosti bio je 1,90 Ωm/dan, pri drugom 0,77, pri trećem 0,25, a pri četvrtom mjerenju nije zabilježen porast.



Sl. 15.2–1. Promjena otpora uzemljenja betonskog uzorka $R_z = f(t)$. Betonski uzorak je ukopan u zemlju, otpornosti ρ_z = 20 Ωm (krivulja 3) i ukopan u tlo i zaliven bentonitom ρ_z = 750 Ωm (krivulja 4).

Usvojeno je razdoblje stabilizacije električnih karakteristika betonskih uzoraka od 300 dana [L1, L2] uz napomenu da se i dalje događa porast otpornosti. Uzorci betona u vodi i bentonitu, gdje je stalno prisutna vlaga, nakon 600 dana potpuno su stabilizirani, a uzorak u zemlji, zbog manjeg sadržaja vlage i njezina osciliranja, i dalje pokazuje tendenciju porasta otpornosti. Dakle, uzorak u zemlji već se ponaša u skladu s promjenama sadržaja vlage u zemlji.

Ta razmatranja, prenesena na stopu temelja (veća količina betona i prisutna željezna armatura), dovode do sljedećih zaključaka:

- Razdoblje stabilizacije približno je jednako razdoblju stabilizacije uzoraka, s tim što se može usvojiti i kraće razdoblje. Za reperni uzemljivač uzeta je temeljna stopa tipa roštilj, čiji se otpor, osim u prva dva – tri mjeseca (razdoblje slijeganja terena), mijenja u skladu s promjenama otpornosti tla.
- Porast otpora temelja, uzorak br. 1 i 2 najviše za 2,5 puta, temelja tipa roštilj 1,38 puta (slika 15.1–2), računajući da je razdoblje stabilizacije 90 dana. Ako se uzme u obzir i utjecaj uzemljivača tipa A, tada je najveći porast otpora za 1,42 puta, što je približno jednako najvećem porastu otpora temelja tipa roštilj.
- Uspoređujući rezultate mjerenja otpora kompletnog temelja stupa (četiri temeljne stope, veća količina betona i željeza) dane u tablici 15.1–2, može se utvrditi da je, ne uzimajući u obzir razdoblje stabilizacije, promjena otpora u trogodišnjem razdoblju mjerenja najviše za 1,25 puta za terene gdje su otpori temelja od 8 do 10 Ω i 1,5 puta za terene s otporima temelja od 3 do 5 Ω. To se uklapa u promjenu otpornosti tla zbog klimatskih prilika.

15.3. ISKUSTVA NEKIH ZEMALJA S UZEMLJIVANJEM DALEKOVODNIH STUPOVA

15.3.1. Iskustva u Ruskoj Federaciji

Posebna se pozornost poklanja uporabi prirodnih uzemljivača – stopa armiranobetonskih temelja pri izgradnji uzemljivača dalekovodnih stupova. Svi stupovi na kojima je postavljeno zemljovodno uže uzemljuju se bez obzira na to od kojeg su materijala napravljeni. Propisuje se dopuštena vrijednost otpora uzemljenja stupa u ovisnosti o otpornosti tla, uzimajući u obzir najnepovoljnije vremensko razdoblje. Za dalekovode s izravno uzemljenim zvjezdištem propisane vrijednosti dane su u tablici 15.3–1.

Tablica 15.3–1. Otpor uzemljenja stupa u ovisnosti o otpornosti tla ρ_z, $R_z = f(\rho_z)$.

Otpornost ρ_z, Ωm		100	100...500	500...1000	1000...5000	preko 5000
		Otpor uzemljenja stupa R_z, Ω				
Nazivni napon dalekovoda, kV	do 300	10	15	20	30	60
	do 500	10	13	15	30	

Za dalekovode od 110 kV i više gdje postoji brza relejna zaštita koja neispravni dio mreže isključuje za 0,15 do 0,5 s ne izvode se zaštitna uzemljenja. U terenima s ρ_z = 200 do 300 Ωm potrebna vrijednost otpora uzemljenja stupova postiže se samo uporabom armiranobetonskog temelja u svojstvu uzemljivača.

15.3.2. Iskustva u Mađarskoj

Prije betoniranja temelja stupa dalekovoda od 110 kV i više na dno se iskopa postavlja uzemljivačka traka [L2]. Mjerenjem dva mjeseca nakon betoniranja provjeri se zadovoljava li takvo uzemljenje. U 85 % slučaja taj način uzemljenja zadovoljava, a u ostalim slučajevima polažu se dodatne uzemljivačke trake. Propisana su sva mjesta na kojima se moraju poduzeti dodatne mjere za oblikovanje potencijala oko stupa.

15.3.3. Iskustva u Francuskoj

Norme EDF-a iz 1970. godine propisuju da svi metalni stupovi moraju biti uzemljeni. Kod njih se uzima u obzir doprinos armiranobetonskog temelja, ali se to uzima s rezervom, budući da prirodni otpor temelja nije stalan u svim vremenskim uvjetima. Zbog toga predviđaju dodavanje posebnog uzemljivača koji treba poboljšati otpor prirodnog uzemljivača. Najčešće se primjenjuju uzemljivači koji se sastoje od dviju neovisnih petlji, koje se postavljaju na dno i na polovicu dubine iskopa, slika 15.1–1. Na stupovima s četiri temeljne stope postavljaju se četiri takva uzemljivača ili dva dijagonalno ili čak samo jedan. Prema praksi u Francuskoj uzemljvač na sve četiri noge, kao na slici 15.1–1 dovoljan je za dalekovode do 400 kV u zemljištu do 200 Ωm [L5]. Za veće vrijednosti otpornosti tla dodaju se trakasti uzemljivači određene duljine.

Utvrđeno je da uzemljivači kao na slici 15.1–1 imaju povoljne karakteristike u pogledu impulsnih struja munje [L8], a dodavanje duljih vodoravnih uzemljivača ne doprinosi bitno poboljšanju impulsnih karakteristika.

Tablica 15.3–2. Vrijednosti otpora uzemljenja stupova dalekovoda u ovisnosti o otpornosti tla [L5].

ρ_z, Ωm	100	300	500
R_z, Ω	5 do 10	10 do 15	15 do 25

15.3.4. Iskustva u SR Njemačkoj

U propisima VDE 0141 iz 1958. i 1964. godine bio je postavljen velik broj zahtjeva u pogledu napona koraka i dodirnog napona. Međutim, iskustvo na tisućama stupova u tijeku 10 godina pokazalo je da su ti zahtjevi pretjerani. U novim propisima

VDE 0141 iz 1976. godine [L3] nema zahtjeva za postavljanje prstenastog uzemljivača na udaljenosti od 1 m od temelja.

Zaštita od povratnog preskoka pri atmosferskim pražnjenjima računa se prema podnosivom udarnom naponu izolacije U_i i tjemenoj vrijednosti udarne struje groma I_u:

$$R_{up} \leq \frac{U_i}{I_u} \tag{15.4–1}$$

gdje je:

R_{up} otpor izolacije dalekovoda pri kojem neće doći do povratnog preskoka

U_i podnosivi napon izolacije dalekovoda za standardni oblik prenaponskog vala 1,2/50 μs, kV

I_u tjemena vrijednost udarne struje munje, kA.

Tjemena vrijednost struje munje koja se s određenom vjerojatnošću neće prekoračiti dana je u tablici 15.3–3.

Tablica 15.3–3. Vjerojatnost struje groma.

Struja u stupu, kA	20	30	40	50	60
Vjerojatnost udara, %	80	90	95	98	99

Za uzemljivače manjih dimenzija uzima se da je udarni otpor uzemljenja jednak otporu uzemljenja dobivenom mjerenjem strujama industrijske frekvencije.

15.3.5. Iskustva u Hrvatskoj

Prema odredbama Pravilnika [50] uzemljenje treba zadovoljiti dva uvjeta:

- sigurnost ljudi od opasnih vrijednosti dodirnog napona i napona koraka
- sigurnost pogona od pojave povratnih preskoka zbog atmosferskih prenapona.

U mrežama s izravno uzemljenim zvjezdištem, pored uređaja za brzo isključenje dionice voda koji je u kvaru (APU), predviđa se i ugradnja jednog ili dva prstena oko svake noge stupa ili oko svih temelja jednog stupa. Ti uzemljivači služe za istodobnu zaštitu od atmosferskih prenapona i od previsokog dodirnog napona.

Prema [L10] preporučeno je da je udarni otpor uzemljenja najviše 15 Ω, a ako se na ekonomičan način ne može postići, pristupa se pojačanju izolacije. Prema [50] dopušteno je da se ne postavljaju uzemljivači na kamenitim terenima, gdje se na ekonomičan način ne može postići zadovoljavajuća vrijednost otpora uzemljenja.

15.3.6. Iskustva u SAD-u

Prema [L4] zahtijevana vrijednost otpora uzemljenja u ovisnosti o naponu dalekovoda, procijenjenoj struji kvara i parametrima munje te namjeni dalekovoda, kom-

binacija je otpora koja se postiže samom konstrukcijom temelja i dodatnih trakastih ili štapnih uzemljivača. U slučaju da se prirodni otpor temelja ne uključi u proračun uzemljivača, nepotrebno se troše sredstva za izradu uzemljivača.

Pored metoda proračuna, u [L4] preporučeno je, da bi se izbjeglo skupo i nesigurno određivanje otpornosti tla, da se vrijednost otpornosti dobije računskim putem na osnovi mjerenja otpora tipskog uzemljivača. Pokazano je da je otpor temelja znatan dio ukupnog otpora potrebnog za odgovarajuće uzemljenje stupova. Također se postavlja pitanje hoće li doći do oštećenja temelja u slučaju protjecanja struje munje velike jakosti. Navodi se primjer da do toga dolazi u slučaju da anker nije povezan u armaturu temelja (ANSI C2, National Electrical Safety Code, 1977.).

15.4. NAPUCI ZA PROJEKTIRANJE

Na osnovi navedenih rezultata dobivenih dugogodišnjim mjerenjima otpora uzemljenja stupova i temelja stupova visokonaponskih vodova te iskustava u drugim državama uputno je pri projektiranju i održavanju dalekovoda visokog napona pridržavati se sljedećih naputaka.

- Za dalekovode s izravno uzemljenim zvjezdištem nazivnog napona od 110 do 400 kV, koji prolaze kroz terene manje otpornosti tla (do oko 300 Ωm), armiranobetonski temelji stupova mogu sami preuzeti ulogu uzemljivača uz uvjet da je armatura temelja galvanski povezana s uzemljivačima u obliku petlje (prstenova).
- Prema rezultatima svjetskih istraživanja [L4, L5, L6], povoljne impulsne karakteristike ima uzemljivač tipa A sa slike 15.1–1, koji ne zahtijeva dodatne zemljane radove, pa je njegova primjena iz ekonomskih i tehničkih razloga poželjna.
- Literatura [L6, L7] ne predviđa postavljanje dodatnih uzemljivača na stupovima koji prolaze kroz terene otpornosti manje od 300 Ωm. Također je i našim pravilnikom [50] u čl. 81. predviđeno da se potrebna vrijednost otpora uzemljenja može dobiti samim ukopavanjem stupova u zemlju.

Stoga je potrebno razmotriti mogućnost izgradnje dalekovoda u određenim terenima bez postavljanja dodatnih uzemljivača:

- Dosad najčešće upotrebljavani uzemljivači tipa D i D1 (slika 15.1–1.b i c) nemaju ni tehničku ni ekonomsku prednost, pa njihovu primjenu treba ograničiti na posebne uvjete.
- Geoelektrično je sondiranje terena za potrebe izgradnje dalekovoda skupo i prilično nesigurno za dobivanje točnih podataka potrebnih za proračun uzemljivača. Umjesto toga, preporučuje se da se pri izradi temelja odmah postave uzemljivači tipa A. Dva do tri mjeseca nakon betoniranja temelja treba izvršiti mjerenje otpora uzemljenja tako formiranog sustava uzemljenja, te iz tog podatka izračunati vrijednost otpornosti tla i eventualno potrebne dodatne trakaste uzemljivače manjih duljina.

Literatura

[L1] Dilberović, N., Veledar, M., Božanović, A.: *Uzemljivači dalekovodnih stupova*, JUKO – CIGRE, 1985.

[L2] Dilberović, N., Veledar, M., Božanović, A.: *Uzemljivači dalekovoda u raznim uslovima vodljivosti tla*, Elektrotehnika 1–2/86.

[L3] VDE 0141/7.76: *Odredbe za uzemljenje u postrojenjima izmjenične struje napona iznad 1 kV*, (prijevod Blaž Uzelac), SEITH, 1976.

[L4] Niles, G. B.: *Using transmission fondation resistance for grounding purposes and in determining an effective earth ressistivity*, IEE PES Winter Meeting, New York an. Feb., 1978.

[L5] Avril, C.: *Construction des lignes aeriennes à haute tension*, Editmons Eyrolles, Paris, 1974.

[L6] *Rukovodjasčie ukazanija po zaščite od pjerenaprjaženija eljektrotehničeskih ustanovok 3 – 500 kV*, El. Stancii 6 i 7/65.

[L7] Kalea, M.: *Izvještaj o stručnoj ekskurziji u Mađarsku i Čehoslovačku u vezi s tipizacijom dalekovoda*, Elektroslavonija, Osijek, 1978.

[L8] Kouteznikoff, P.: *Reponse impulsionnele des prises de terre au courants de foundre*, Cigre, Stockholm, 1981.

[L9] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova, Sl. list SFRJ 69/73.

[L10] Tehnička preporuka br. 9 za izvođenje uzemljenja i stupova dalekovoda, Proc. Zajednica elektrodistribucije Srbije, Beograd, 1979.

[L11] Cimador, A., Fieuz, R., Hutzler, B.: *Influence des Resistences Terre sur le foudroiement des Pylones d'une Ligne 225 kV*, E.D.F. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie B, No 4, 1974.

16. ANALIZA IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA STUPOVA NADZEMNIH VODOVA VISOKOG NAPONA [77]

16.1. IMPULSNI OTPOR UZEMLJIVAČA R_i

Osnovna veličina koja karakterizira uzemljivač pri odvođenju struje munje u zemlju njegova je impedancija Z_i koja, za razliku od stacionarnog otpora uzemljenja, pri frekvenciji od 50 (60) Hz ovisi i o induktivitetu i kapacitetu elemenata uzemljivača te o procesu ionizacije tla oko uzemljivača.

Zbog vremenske promjene naponskog vala atmosferskih prenapona tijekom trajanja vala prenapona mijenjaju se parametri induktiviteta i kapaciteta uzemljivača, a time i impedancija uzemljivača. Uobičajeni način analitičkog modeliranja struje munje primjena je dvostruke eksponencijalne funkcije:

$$i(t) = I_u\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) \tag{16.1–1}$$

Parametri α i β definiraju gornju funkciju i određuju se iz vremena trajanja čela vala i hrpta vala, za udarnu (maksimalnu) struju munje I_u.

Impulsna impedancija uzemljivača, iz navedenih razloga definira se stacionarna vrijednost s pomoću omjera amplitude napona V_{maks} i amplitude struje munje I_u, te je:

$$Z_i = \frac{V_{\text{maks}}}{I_u} \approx R_i \tag{16.1–2}$$

Iz praktičnih razloga i uz neznatne pogreške poistovjetit ćemo impulsnu impedanciju uzemljenja Z_i s impulsnim otporom uzemljenja, te je $Z_i \approx R_i$. Naime, uvođenje impulsne impedancije uzemljivača Z_i unijelo bi pomutnju jer svi propisi i norme

definiraju otpor uzemljenja pri udarnoj struji groma I_u. On se zato naziva udarni otpor uzemljenja ili impulsni otpor uzemljenja R_i.

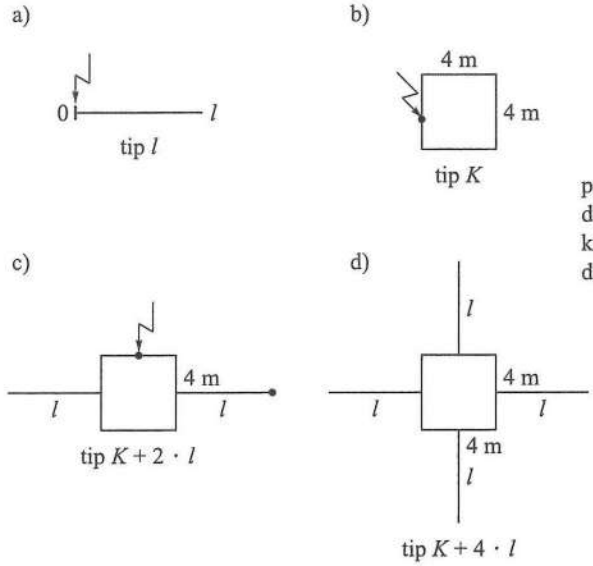
Omjer impulsnog otpora uzemljenja R_i i stacionarnog otpora uzemljenja R_z, koji je mjerodavan za odvođenje struje frekvencije 50 Hz takozvani je impulsni koeficijent α_i:

$$\alpha_i = \frac{R_i}{R_z} \tag{16.1–3}$$

Impulsni koeficijent α_i može poprimiti manje ili veće vrijednosti od 1 ovisno o geometrijskim karakteristikama uzemljivača, otpornosti tla i karakteristikama struje munje (strmini čela munje i amplitudi struje munje), kako je to obrađeno u poglavlju 11.

16.2. PRIMJERI IZRAČUNA IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA ZA RAZLIČITE KONSTRUKCIJE UZEMLJIVAČA

Proračun uzemljivača obavlja se modeliranjem, slika 16.2–1. S pomoću metode napona čvorova, slično proračunima kratkog spoja u elektroenergetskim mrežama, naponi pojedinih čvorova dobivaju se zbrajanjem prethodno izračunanih napona. Opisani postupak ne postavlja ograničenja na oblik uzemljivača, te je zato pogodan za proračune impulsne impedancije uzemljivača stupova nadzemnih vodova.



polumjer užeta $a = 0{,}005$ m
dubina ukopa $h = 0{,}7$ m
kritična jakost polja $E_k = 1200$ kV/m
dielektrična konstanta tla $\varepsilon_r = 10$.

Sl. 16.2–1. Analizirani uzemljivači

Pri odvođenju veoma velikih struja munje s elemenata uzemljivača u zemlju može doći do ionizacije zemljišta u neposrednoj blizini uzemljivača. Taj proces nastupa ako gustoća struje odvođenja prijeđe iznos koji stvara električno polje jakosti veće od kritične E_k. Navedeni utjecaj odražava se u povećanju ekvivalentnog polumjera vodiča uzemljivača [L1].

Impulsni otpori uzemljivača stupova ovise o otpornosti tla, duljini elemenata uzemljivača, probojnoj čvrstoći tla, karakteristikama struja munje itd.

Sve navedene parametre teško je točno odrediti, pogotovo jer se radi o velikom broju stupova. Zbog toga je pogodno poći od formule (16.2–1):

$$R_i = \alpha_i R_z = \alpha_i \cdot \rho_z \cdot c_r \qquad (16.2\text{–}1)$$

Brojčana vrijednost konstante c_r jednaka je stacionarnom otporu uzemljenja pri otpornosti od 1 Ωm, a može se odrediti računalnim proračunom [L5]. Za tipične uzemljivače stupova nadzemnih vodova prikazanih na slici 16.2–1 vrijednosti konstante c_r dane su u tablici 16.2–1.

Tablica 16.2–1. Konstanta c_r za duljine i tipove uzemljivača pri otpornosti tla ρ_z = 1 Ωm.

Tip uzemljivača	c_r, 1/m	Tip uzemljivača	c_r, 1/m	Tip uzemljivača	c_r, 1/m
l = 5 m	0,253				
l = 10 m	0,144	K (4 × 4 m)	0,113		
l = 15 m	0,100	K + 2 × 5 m	0,082	K + 4 × 5 m	0,065
l = 20 m	0,083	K + 2 × 10 m	0,059	K + 4 × 10 m	0,044
l = 25 m	0,070	K + 2 × 15 m	0,047	K + 4 × 15 m	0,035
l = 30 m	0,059	K + 2 × 20 m	0,039	K + 4 × 20 m	0,027

O veličini impulsnog koeficijenta α_i izloženo je u [L8]. U ovom razmatranju dat ćemo vrijednosti koje se odnose na amplitudu struje munje od I_u = 20 kA i za prosječno trajanje struje munje od 5,5/75 μs. Struje oblika 1,8/30 μs veoma se rijetko pojavljuju (u manje od 5 % slučajeva). Osim toga, značajne razlike između impulsnih koeficijenata izračunanih za navedene oblike struja nastaju samo na terenima ekstremno niske otpornosti tla, a već na terenima otpornosti od 100 Ωm te razlike nisu jako izražene. Veličine impulsnih koeficijenata i za tipične uzemljivače stupova dalekovoda sa slike 16.2–1 prikazane su u tablici 16.2–2.

Proračunima je utvrđeno da su impulsni koeficijenti uzemljivača tipa $K + 3 \times l$ samo neznatno veći od impulsnih koeficijenata uzemljivača tipa $K + 2 \times l$, uz istu duljinu pojedinih krakova. Budući da ta razlika nije prešla 10 %, usvojene su istovjetne vrijednosti za oba tipa uzemljivača.

S pomoću navedenih koeficijenata iz tablica 16.2–1 i 16.2–2 lako je dobiti uvid u impulsne karakteristike tipičnih uzemljivača nadzemnih vodova. Za sve duljine elemenata uzemljivača te otpornosti tla koje nisu dane u tablicama 16.2–1 i 16.2–2 koeficijenti se mogu odrediti interpolacijom.

Tablica 16.2–2. Impulsni koeficijenti α_i za tipove uzemljivača na slici 16.2–1 za navedene otpornosti tla, ρ_z.

Tip uzemljivača: tip l, duljine l, m	ρ_z, Ωm	α_i	Tip uzemljivača: K, $K+2\times l$ i $K+4\times l$	ρ_z, Ωm	α_i
5	10	1,00	K (4 × 4 m), tip K	10	1,05
	100	0,68		100	0,87
	500	0,49		500	0,74
	1000	0,40		1000	0,68
10	10	1,53	$K+2\times 5$ m, tip $K+2\,l$	10	1,40
	100	0,80	$K+4\times 5$ m, tip $K+4\,l$	100	0,91
	500	0,63		500	0,77
	1000	0,55		1000	0,70
15	10	2,11	$K+2\times 10$ m, tip $K+2\times l$	10	1,83
	100	0,86	$K+4\times 10$ m, tip $K+4\times l$	100	0,98
	500	0,68		500	0,83
	1000	0,61		1000	0,72
20	10	2,71	$K+2\times 15$ m, tip $K+2\times l$	10	2,25
	100	0,94	$K+4\times 15$ m, tip $K+4\times l$	100	1,02
	500	0,73		500	0,85
	1000	0,67		1000	0,77
25	10	3,32	$K+2\times 20$ m, tip $K+2\times l$	10	2,61
	100	1,11	$K+4\times 20$ m, tip $K+4\times l$	100	1,06
	500	0,76		500	0,87
	1000	0,70		1000	0,81
30	10	3,81			
	100	1,34			
	500	0,79			
	1000	0,73			

Upotrebu približne metode interpolacije ilustrirat ćemo na sljedećem primjeru.

Primjer 16A

Uzemljivač je izveden u obliku konture s dva dodatna kraka duljine 15 m svaki, otpornost tla iznosi $\rho_z = 300$ Ωm.

Geometrijska konstanta uzemljivača c_r očitava se iz tablice 16.2–1 (tip $K + 2 \times 15$) i iznosi:

$$c_r = 0{,}047 \left(\frac{1}{\text{m}}\right)$$

Impulsni koeficijent α_i određuje se s pomoću tablice 16.2–2. Za otpornosti tla $\rho_z = 100$ Ωm i 500 Ωm očita se, a za $\rho_z = 300$ Ωm izračuna se interpolacijom:

$$\rho_z = 100\ \Omega\text{m},\ \alpha_i = 1{,}02,$$

$$\rho_z = 500\ \Omega\text{m},\ \alpha_i = 0{,}85,$$

$$\rho_z = 300\ \Omega\text{m},\ \alpha_i = 0{,}935,$$

te su impulsni otpori uzemljenja, primjenom formule (16.2–1):

$$R_{i(100)} = 0{,}047 \cdot 100 \cdot 1{,}02 = 4{,}794\ \Omega$$

$$R_{i(300)} = 0{,}047 \cdot 300 \cdot 0{,}935 = 13{,}1835\ \Omega$$

$$R_{i(500)} = 0{,}047 \cdot 500 \cdot 0{,}85 = 19{,}975\ \Omega$$

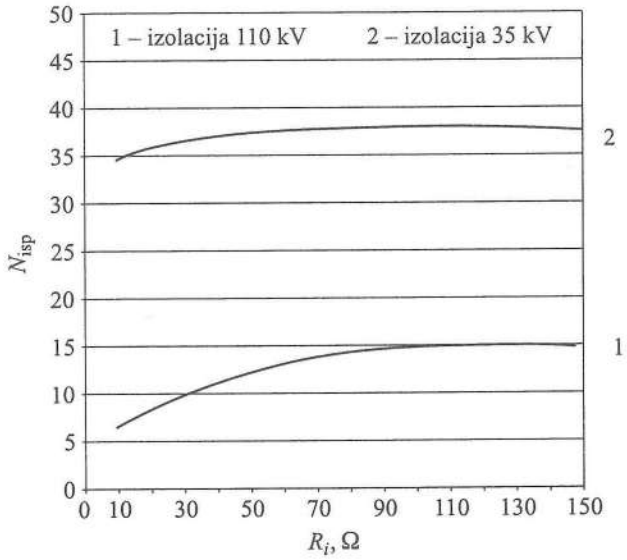
Predložena je metoda veoma jednostavna te može korisno poslužiti projektantima za brz proračun impulsnog otpora uzemljenja. Međutim, za detaljnija istraživanja impulsnih karakteristika uzemljivača te analizu svih utjecajnih parametara nužna je uporaba računala.

16.3. UTJECAJ IMPULSNOG OTPORA UZEMLJENJA STUPOVA DALEKOVODA 110 KV NA BROJ PRESKOKA (TRAJNIH ISPADA) VODA [77]

Za uzemljenje stupova dalekovoda 110 kV Vrgorac–Ploče upotrijebljeni su uzemljivači trokrake zvijezde 3 × 30 m s kracima duljine 10 m (1 × 10 m) (vrlo skromno dimenzioniranje). Pretpostavljen je oblik struje munje od 5,5/70 s, te amplituda od 20 kA. Rezultati proračuna dani su u tablici 16.3–1. Proračun očekivanog broja preskoka na izolaciji razmatranog voda izvršen je programom ATPREN Instituta za elektroprivredu u Zagrebu [L5]. Metodologija proračuna navedena je u literaturi [50]. Ispitivanje je posebno izvršeno za prvu fazu pogona (izolacijska razina 170 kV), te za konačnu fazu pogona (izolacijska razina 450 kV). Impulsni otpori uzemljivača variraju u širokim granicama: od 10 do 150 Ω. Rezultati proračuna očekivanog broja preskoka dani su na slici 16.3–1.

Tablica 16.3–1. Impulsni otpori uzemljivača R_i.

Tip uzemljivača	ρ_z, Ωm	R_i, Ω	α_i
1 × 10 m	1000	79,70	0,55
	2000	138,60	0,48
	3000	190,17	0,44
3 × 30 m	1000	20,85	0,85
	2000	39,20	0,80
	3000	56,65	0,70



Sl. 16.3–1. Broj preskoka na godinu N_{isp} na dalekovodu od 110 (35) kV Vrgorac–Ploče.

Najznačajniji je zaključak koji proizlazi iz dijagrama na slici 16.3–1 činjenica da impulsni otpori uzemljenja relativno malo utječu na očekivani broj preskoka. To se osobito odnosi na prvu fazu pogona voda (pod naponom od 35 kV). U idućoj fazi (pogon pod naponom od 110 kV) taj je utjecaj nešto veći. To se može ilustrirati sljedećim primjerom.

Primjer 16B

Kako impulsni otpor uzemljenja R_i dalekovoda 110 kV utječe na broj ispada dalekovoda za sljedeće vrste uzemljivača i otpornost tla na kojem su stupovi dalekovoda?

a) Otpornost tla ρ_z = 1000 Ωm. Uzemljivač 1 × 10 m ima, prema tablici 16.3–1, impulsni otpor R_i = 79,7 Ω. Prema dijagramu na slici 16.3–1 očekivani broj preskoka iznosi oko N_{uk} = 13,3/god. Uzemljivač 3 × 30 m ima impulsni otpor 20,85 Ω. Očekivani broj preskoka iznosi oko 8,2/god. Broj trajnih ispada računa se po formuli:

$$N_{isp} = (0{,}1 \text{ do } 0{,}2) \times N_{uk} \tag{16.3–1}$$

– uz uzemljivač 1 × 10 m:

$$N_{isp} = 1{,}3 \text{ do } 2{,}6/\text{god.}$$

– uz uzemljivač 3 × 30 m:

$$N_{isp} = 0{,}8 \text{ do } 1{,}6/\text{god.}$$

b) Otpornost tla $\rho_z = 3000\ \Omega\text{m}$. Uzemljivač 1 × 10 m ima prema tablici 16.3–1 impulsni otpor $R_i = 190\ \Omega$. Prema dijagramu na slici 16.3–1 očekivani broj preskoka iznosi 15,6/god. Uzemljivač 3 × 30 m ima impulsni otpor od 56,6 Ω. Očekivani broj preskoka iznosi 11,9 god. Broj trajnih ispada uvjetovan radom sustava za automatski ponovni uklop APU iznosi (16.3–1):

– uz uzemljivač 1 × 10 m:

$$N_{\text{isp}} = 1{,}6 \text{ do } 3{,}2/\text{god}$$

– uz uzemljivač 3 × 30 m:

$$N_{\text{isp}} = 1{,}2 \text{ do } 2{,}4/\text{god}.$$

Očito je da na terenima visoke otpornosti tla nema smisla postavljati velike uzemljivače, jer je tehnički dobitak (u smanjenju broju ispada) veoma mali, a polaganje velikih uzemljivača rezultira visokim troškovima.

Literatura

[L1] Žutobradić, S.: *O vjerojatnosti nastanka povratnog preskoka na elektrodistributivnim vodovima*, Energija, 2/1986.

[L2] Milanković, Lj.: *Tehnika visokog napona*, ETF Beograd, 1981.

[L3] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova*, Sl. list SFRJ, 51/1973.

[L4] Grant, J.: *A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines*, IEE PAS No 4, 1985.

[L5] Žutobradić, S.: *Dimenzioniranje uzemljivača – impulsne karakteristike i program za proračun udarnog otpora*, Studija IE, Zagreb, 1985.

[L6] Žutobradić, S.: *Proračun impulsnih karakteristika složenih uzemljivača*, Elektrotehnika, 1–2/1986.

[L7] Žutobradić, S., Puharić, M.: *Uloga uzemljivača stupova u zaštiti distributivnih vodova od atmosferskih prenapona*, Energija

[L8] Žutobradić, S.: *Doprinos istraživanju impulsnih karakteristika izmjenjivača*, disertacija, ETF Zagreb, 1989.

[L9] Jung, M.: *Izokerauničkа karta SR Hrvatske*, IE, Zagreb, 1965.

[L10] Puharić, M.: *Metode proračuna atmosferskih prenapona*, magistarski rad, ETF Zagreb, 1987.

[L11] Brown, G.: *Lightning Performance – II*, IEEE PAS, No 1, 1978.

17. UZEMLJENJE OGRADE ELEKTROENERGETSKOG POSTROJENJA I MJERE ZA SMANJENJE DODIRNOG NAPONA [57]

Ograda se može uzemljiti tako da je galvanski odvojena ili spojena na glavni uzemljivač. U našoj se literaturi uglavnom preporučuje galvansko odvajanje ograde i njezino uzemljenje s pomoću prstenastog trakastog uzemljivača postavljenog u tlu oko ograde na udaljenosti od 1 m, te na dubini od oko 0,5 m. Galvanskim odvajanjem od glavnog uzemljivača postiže se smanjenje potencijala ograde, dobivaju se blaži potencijalni lijevci u njezinoj blizini, što dovodi do smanjenja odgovarajućih dodirnih napona [L4, L5]. Međutim, dovoljno niski dodirni naponi mogu se postići spajanjem ograde na glavni uzemljivač, što ovisi o razdiobi potencijala i konfiguraciji uzemljivača.

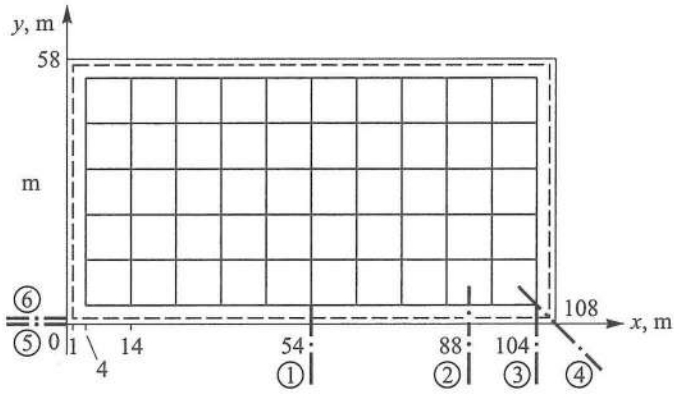
Proračun potencijala i dodirnog napona ograde radi se poznatom metodom srednjih potencijala [L3, L4]. Analizira se samo dodirni napon i to na udaljenosti od 2 do 3 m od ograde u smjeru okomitom od ograde, a rjeđe se analizira napon koraka jer je on znatno manji problem od dodirnog napona. U našoj su literaturi do sada uglavnom rađeni proračuni i analizirane veličine dodirnog napona duž ograde u zavisnosti o udaljenosti ograde od glavnog uzemljivača [L4, L5], bez ulaženja u uzroke raspodjele dodirnog napona duž ograde. U ovoj analizi dodirnog napona duž ograde radi se analiziranjem izobličenja električnog polja glavnog uzemljivača zbog unošenja uzemljivača ograde kao pasivne elektrode [L6]. Radi ocjene utjecaja uzemljivača ograde na potencijal i dodirne napone, proračunavaju se i analiziraju i dodirni naponi neuzemljene ograde. Cilj je ove analize da se omogući približna procjena gdje i zašto se očekuju povišeni dodirni naponi, odnosno na kojim je mjestima potrebno primijeniti mjere za njihovo smanjenje. Zanemaruje se utjecaj otpora uzemljenja stupića i raspored tih uzemljivača na razdiobu potencijala. Također se zbog jednostavnosti

proračuna pretpostavlja homogeno tlo. Ako se npr. pojavljuju opasni dodirni naponi i naponi koraka oko ograde, potrebno je na tim površinama nasuti tucanik i primijeniti proračun dodirnog napona za dvoslojno tlo sa znatno većom otpornošću gornjeg sloja tla ($\rho_{z1} > \rho_{z2}$).

17.1. ANALIZA DODIRNOG NAPONA OGRADE

Analiziran je mrežasti uzemljivač 108 × 58 m s površinom reda veličine uzemljivača TS 110/X kV prema slici 17.1–1 na kojoj su prikazani i pravci proračuna potencijala na površini tla i u samom tlu za ove podatke:

- otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega$m
- struja jednopolnoga kratkog spoja $I_z = 1000$ A
- vodič glavnog uzemljivača i vodič uzemljivača ograde: čelična pocinčana traka 30 mm × 4 mm
- dubina ukopa trake glavnog uzemljivača $h = 0{,}8$ m
- dubina ukopa trake uzemljivača ograde $h = 0{,}5$ m



①...⑥ – pravci proračuna

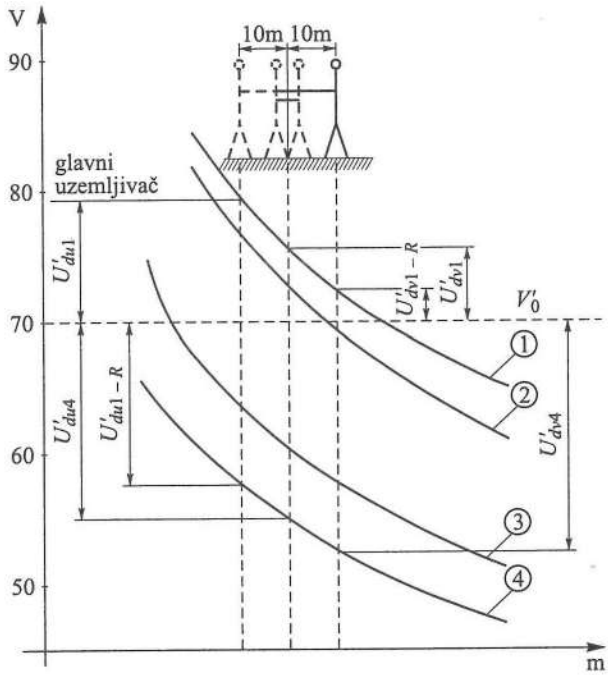
Sl. 17.1–1. Analizirani mrežasti uzemljivač i pravci proračuna raspodjele potencijala.

17.2. NEUZEMLJENA OGRADA

U slučaju zemljospoja ili jednopolnoga kratkog spoja točke tla u blizini ograde dolaze na povišeni potencijal, a time i sama ograda zbog kontakta njezinih nosivih stupića s tlom. Pretpostavi li se da su stupići uzemljeni, tada svaki stupić poprima potencijal pripadajuće točke tla uz neznatno lokalno izobličenje razdiobe potencijala. Pri tome su, kod geometrijski pravilnih uzemljivača kao što je primjerice onaj na slici

17.1–1, najniži potencijali točaka tla na rubovima (pravac 4), a najviši na srednjim dijelovima ograde (pravac 1) jer su na rubovima potencijalni lijevci najstrmiji, a na srednjim dijelovima najblaži.

Postavljenjem kompletne ograde, ona zbog galvanske povezanosti čitavom svojom duljinom poprima približno konstantan potencijal, čija se vrijednost nalazi između najmanjeg i najvećeg prethodnog (bez ograde) potencijala točaka tla ispod stupića. Veličina potencijala ograde ovisi o rasporedu stupića i kakvoći dodira pojedinih stupića. Ako je jednak dodir svih stupića s tlom, tada ograda poprima približno prosječnu vrijednost potencijala pripadajućih točaka tla. Zbog toga ograda ima na rubovima viši, a na sredini niži potencijal u odnosu na potencijal bliskih točaka tla izvan ograde, odnosno na rubovima se pojavljuju pozitivni vanjski naponi dodira, a na sredini negativni.



Sl. 17.2–1. Raspodjela potencijala i naponi dodira duž odabranih pravaca na duljini od 20 m pri neuzemljenoj ogradi.

Na slici 17.2–1 prikazana je raspodjela potencijala na površini tla duž pravaca 1, 2, 3 i 4, te odgovarajući karakteristični dodirni naponi gdje je:

U'_{dv1} dodirni napon na vanjskom dijelu ograde na udaljenosti od 10 m, po pravcu 1

V'_0 potencijal ograde, V i u ovom primjeru je 70 V

U'_{du1} dodirni napon na unutarnjem dijelu ograde po pravcu 1

U'_{du4} dodirni napon na unutarnjem dijelu ograde po pravcu 4
U'_{dv4} dodirni napon na vanjskom dijelu ograde po pravcu 4
U'_{du1-R} unutarnji dodirni napon po pravcu 1 na udaljenosti od 10 m
U'_{dv1-R} vanjski dodirni napon po pravcu 1 na udaljenosti od 10 m.

Približna vrijednost potencijala ograde V'_0 dobivena je u tom primjeru proračunom potencijala trake ukopane plitko u tlo (na dubini od 0,1 m) točno ispod ograde, čime je uzeto kao da su stupići gusto raspoređeni duž ograde. Raspodjela potencijala duž odabranih pravaca dobivena je uzimanjem u obzir samo glavnog uzemljivača, čime je zanemaren utjecaj stupića ograde.

Na slici 17.2–1 vidimo da se najveći dodirni napon na unutarnjem i vanjskom dijelu ograde pojavljuje po pravcu 4, U'_{du4} i U'_{dv4}.

Međutim, u slučaju ograde galvanski odvojene od glavnog uzemljivača dolazi do sljedećih pojava:

- negativni dodirni naponi s vanjske strane ograde najveći su uz samu ogradu, a ne na 1 m udaljenosti
- pozitivni dodirni naponi s unutarnje strane ograde (obično na rubovima ograde) isto tako su najveći u točkama tla uz samu ogradu.

Ta pojava nastaje zbog opisanih odnosa potencijala ograde i lokalnih raspodjela potencijala na površini bliskog tla, a to je jasno vidljivo na slici 17.2–1. Zbog navedenih pojava treba računati dodirne napone ne samo na udaljenosti od 1 m od ograde već i uz samu ogradu, te odabrati veću od te dvije vrijednosti.

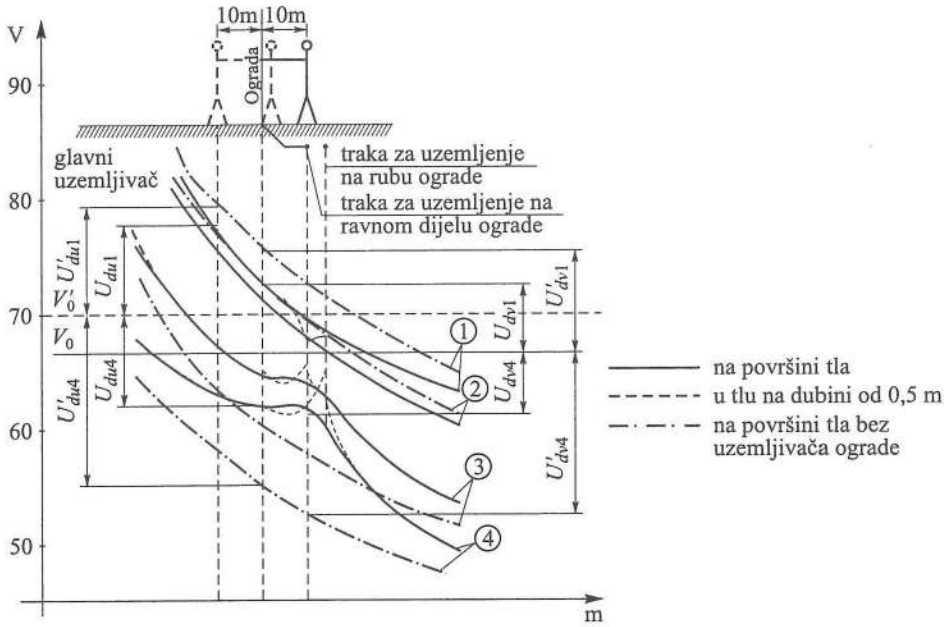
Slični odnosi vrijede i u slučaju uzemljene ograde. Dodirni naponi uz samu ogradu mogu imati znatno veću apsolutnu vrijednost nego na udaljenosti od 1 m. To posebno vrijedi u točkama između dvaju stupića, gdje je njihov utjecaj najmanji, te ujedno podjednak uz ogradu i na udaljenosti od 1 m.

17.3. UZEMLJENA OGRADA

U našim se propisima [16] u slučaju pojave nedopuštenih dodirnih napona ograde traži njezino uzemljenje prstenastim uzemljivačem položenim u tlo oko ograde na udaljenosti od 1 m i na dubini od 0,5 m. U našoj literaturi koja se bavila ovim problemima izveden je netočan zaključak da je doprinos tog uzemljivačkog prstena samo u smanjenju potencijala ograde, a ne u oblikovanju potencijala (tj. mijenjanju potencijala točaka obližnjeg tla u smislu smanjenja razlike između potencijala tla i potencijala ograde). Međutim, oblikovanje potencijala uvelike doprinosi smanjenju dodirnog napona, posebno na najkritičnijim mjestima.

Na sl. 17.3–1 prikazana je raspodjela potencijala duž pravaca 1, 2, 3 i 4, te pripadajući dodirni naponi za slučaj uzemljene ograde, gdje je:

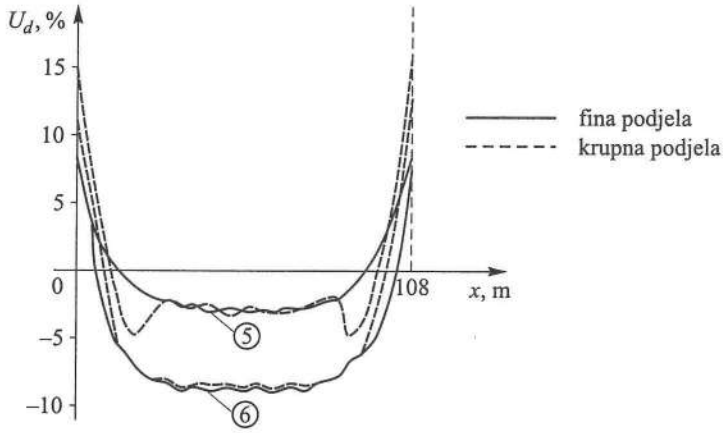
V'_0 potencijal mrežastog uzemljivača bez spoja s uzemljivačem ograde
V_0 potencijal mrežastog uzemljivača sa spojenim uzemljivačem ograde.



Sl. 17.3–1. Raspodjela potencijala i naponi dodira duž odabranih pravaca, ograda uzemljena prema slici 17.2–1.

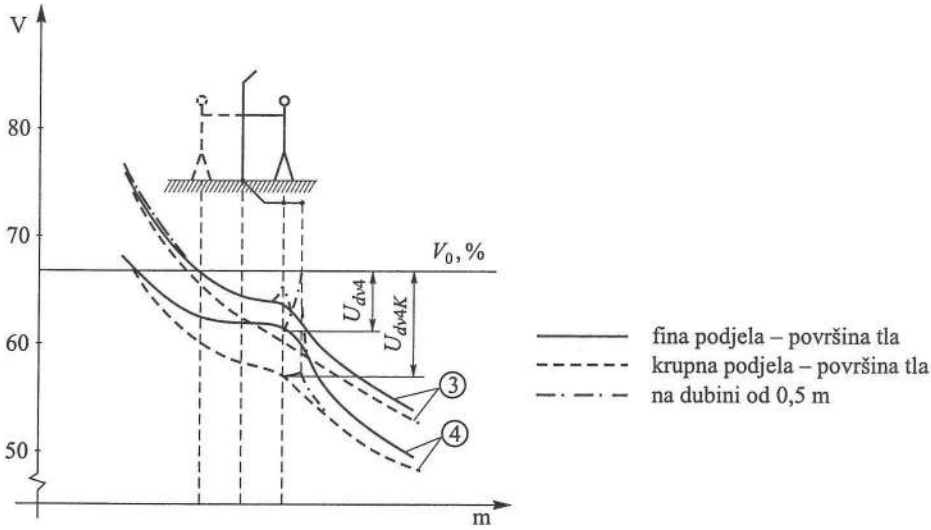
Na istoj su slici za usporedbu prikazani i potencijalni lijevci i dodirni naponi u slučaju neuzemljene ograde. Također je prikazana i raspodjela potencijala na dubini od 0,5 m (pravac kroz vodič uzemljivača ograde), gdje dolazi do najvećeg izobličenja potencijala [L6]. Vidi se da je uzemljenjem ograde došlo do smanjenja potencijala ograde (oko 5 %). Razlog je tom smanjenju u tome što je ograda poprimila potencijal prstenastog uzemljivača, koji je udaljeniji od glavnog uzemljivača. Međutim, najznačajnije je to što je došlo do znatnog smanjenja vanjskoga dodirnog napona na rubu na pravcu 4 (oko 71 %) (U'_{dv4} smanjio se na U_{dv4}). Tom je smanjenju sniženje potencijala ograde pridonijelo oko 20,5 %, a izjednačenje potencijala oko 50,5 %. Na sredini ograde (pravac 1) došlo je do povećanja vanjskoga dodirnog napona U'_{dv1} (oko 12,6 %). Tu se pojavio dvojaki efekt uzemljenja ograde: pogoršanje zbog smanjenja potencijala ograde uz poboljšanje zbog izjednačenja potencijala. U drugim točkama došlo je do smanjenja pozitivnih dodirnih napona i malog povećanja negativnih. Najviša vrijednost vanjskoga dodirnog napona u sredini ograde pojavila se u točkama uz ogradu, i čak je ta vrijednost malo premašila napon dodira na rubu (apsolutna vrijednost).

Na slici 17.3–2 prikazana je raspodjela vanjskih dodirnih napona u točkama iznad uzemljivača ograde (pravac 5) i uz samu ogradu (pravac 6). Vidi se da su na srednjem dijelu znatno veći dodirni naponi uz ogradu (pravac 6) od napona dodira na udaljenosti od 1 m od ograde (pravac 5).



Sl. 17.3–2. Dodirni naponi duž ograde po pravcima 5 i 6.

Na slici 17.3–3 prikazana je raspodjela potencijala duž pravaca 3 i 4 i dodirni naponi za slučajeve fine i krupne podjele trake uzemljivača ograde. Krupnijom podjelom stranice uzemljivača ograde dijele se na po 5 dijelova (ukupno 20). Finom podjelom uzimaju se sve kraći elementi prema rubu (od nekoliko metara do minimalno 0,1 m), gdje je znatno strmija raspodjela struja duž uzemljivača [L6].

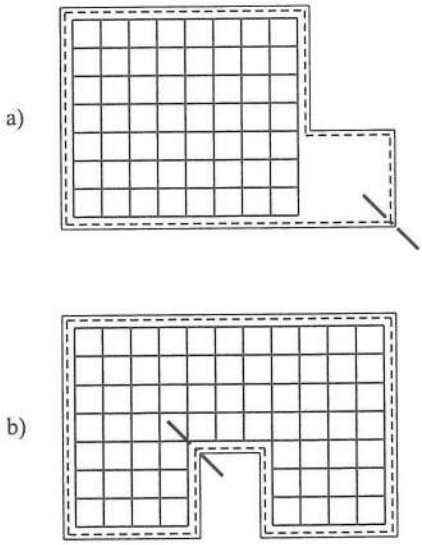


Sl. 17.3–3. Usporedba raspodjele potencijala i dodirnog napona za slučaj finije i krupnije podjele trake uzemljivača ograde.

Krupnijom podjelom dobivaju se znatno veći dodirni naponi na rubnim dijelovima (oko 87,6 %). To je zato što pri krupnijoj podjeli rubni dijelovi uzemljivača

ograde dobivaju računom prosječnu gustoću struje krajnjih elemenata koja je znatno niža od stvarne gustoće na rubu [L6]. Iz navedenog se vidi kolika je važnost dovoljno sitne podjele uzemljivača ograde, posebno na rubnim dijelovima, za točan proračun dodirnog napona. Na srednjim dijelovima ograde nisu dobivena znatnija odstupanja dodirnog napona pri proračunu s krupnijom i finijom podjelom, zbog blage krivulje raspodjele struja na srednjim dijelovima.

Na slici 17.3–4 prikazani su karakteristični uzemljivači koji se pojavljuju u praksi. Zbog udaljavanja ograde od glavnog uzemljivača, izrazito su nepovoljni uvjeti na rubu, sl. 17.3–4.a, a zbog uvučenog dijela ograde, slika 17.3–4.b, nepovoljni su uvjeti i na sredini. U tom slučaju ograda prolazi točkama tla znatno nižeg potencijala, a u drugom slučaju znatno višeg potencijala.



Sl. 17.3–4. Karakteristični uzemljivači s izrazito nepovoljnim uvjetima na rubu, te na sredini.

Ovdje je važno napomenuti da pogoršani uvjeti na rubu na slici 17.3–4.a uzrokuju pogoršanje prilika na srednjim dijelovima zbog sniženja potencijala ograde. Sličan je učinak pogoršanja prilika na rubnim dijelovima uzemljivača sa slike 17.3–4.b, ali zbog povećanja potencijala ograde, kako je to označeno kosom crtom.

17.4. NAPUCI ZA PROJEKTIRANJE I IZRADU UZEMLJIVAČA OGRADE

Analiza i proračun doveli su do sljedećih zaključaka koji se odnose na slučaj galvanski odvojene ograde od glavnog uzemljivača.

a) U slučaju neuzemljene ograde, kod uobičajenih oblika uzemljivača, najveći dodirni naponi s vanjske i unutarnje strane ograde pojavljuju se na rubnim dijelovima, gdje su potencijalni lijevci najstrmiji.
b) Uzemljenjem ograde trakom položenom u tlo s vanjske strane ograde, na udaljenosti od 1 m i na dubini od 0,5 m, postiže se:
   – sniženje potencijala ograde
   – oblikovanje potencijala.
c) Navedeni učinci pri uobičajenim izvedbama uzemljivača, znatno smanjuju pozitivne dodirne napone na rubnim dijelovima, a malo (apsolutno) povećavaju negativne dodirne napone na srednjim, odnosno uvučenim, dijelovima ograde.
d) Najveća vrijednost vanjskoga negativnoga dodirnog napona ograde (obično na srednjim, odnosno uvučenim dijelovima ograde) kod uobičajenih oblika uzemljivača pojavljuje se u točkama uz ogradu, a ne na udaljenosti od 1 m, kako se to do sada uzimalo. To je vrlo značajno i zbog toga što u nekim karakterističnim primjerima iz prakse navedeni dodirni naponi mogu biti znatno viši (apsolutno) od pozitivnih dodirnih napona na rubovima.
e) Krupnijom podjelom mrežastog uzemljivača dobivaju se znatno veće vrijednosti dodirnog napona na rubovima od stvarnih, a nešto manje (apsolutno) na srednjim (uvučenim) dijelovima. Pri tome je važna fina podjela na rubnim dijelovima gdje je znatno strmija raspodjela potencijala duž uzemljivača.
f) Za smanjenje potencijala mrežastog uzemljivača elektroenergetskih postrojenja i povoljnije razdiobe potencijala uputno je prema [4, 32] umjesto mrežastog uzemljivača upotrijebiti kombinirani uzemljivač (npr. mrežasti sa štapnim uzemljivačima).

17.5. MJERE ZA SMANJENJE DODIRNOG NAPONA OGRADE ELEKTROENERGETSKOG POSTROJENJA

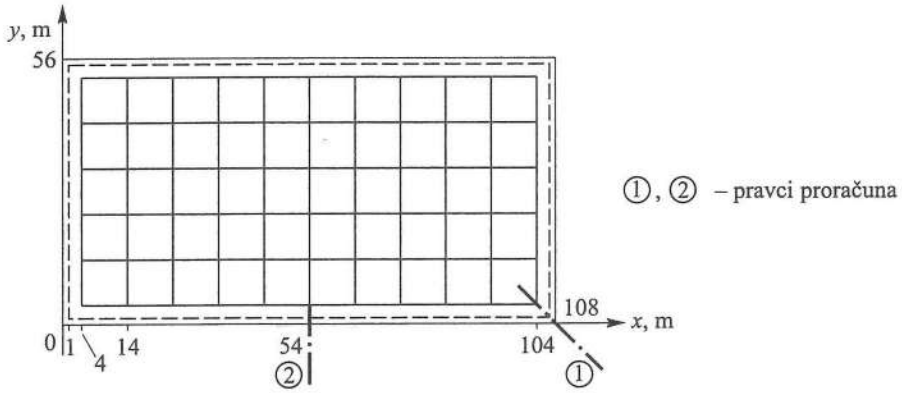
Mjere za smanjenje dodirnog napona ograde dijele se na mjere za oblikovanje potencijala i mjere za mijenjanje potencijala ograde, iako se njihovi učinci ne mogu sasvim razlučiti.

Kao u [L7], i u ovom je razmatranju obrađen samo slučaj homogenog tla, te galvanski odvojene ograde od glavnog uzemljivača.

Vrednovanje pojedinih mjera provedeno je odgovarajućim računalnim proračunima poznatom metodom srednjih potencijala [L3, L4].

Na slici 17.5–1 prikazan je analizirani uzemljivač (nešto izduženi uzemljivač reda veličine uzemljivača TS 110/X kV, kao u [L7]). Vodič glavnog uzemljivača i uzemljivača ograde pocinčana je čelična traka presjeka 30 mm × 4 mm.

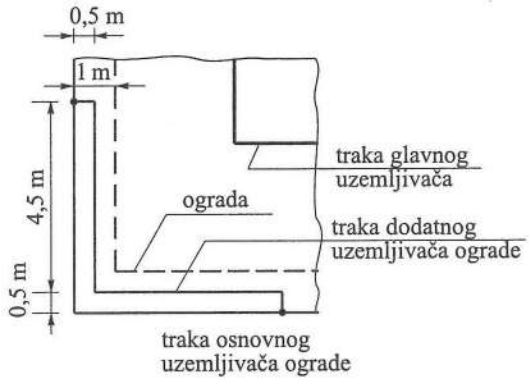
Prikazani su rezultati proračuna samo na rubu i na sredini ograde (pravci 1 i 2), s obzirom na to da se na tim mjestima pojavljuju najveće apsolutne vrijednosti napona dodira ograde. Isti odnos ostao je i pri primjeni mjera za smanjenje dodirnog napona.



Sl. 17.5–1. Analizirani mrežasti uzemljivač i pravci proračuna raspodjele potencijala.

17.5.1. Izjednačenje potencijala na rubovima ograde

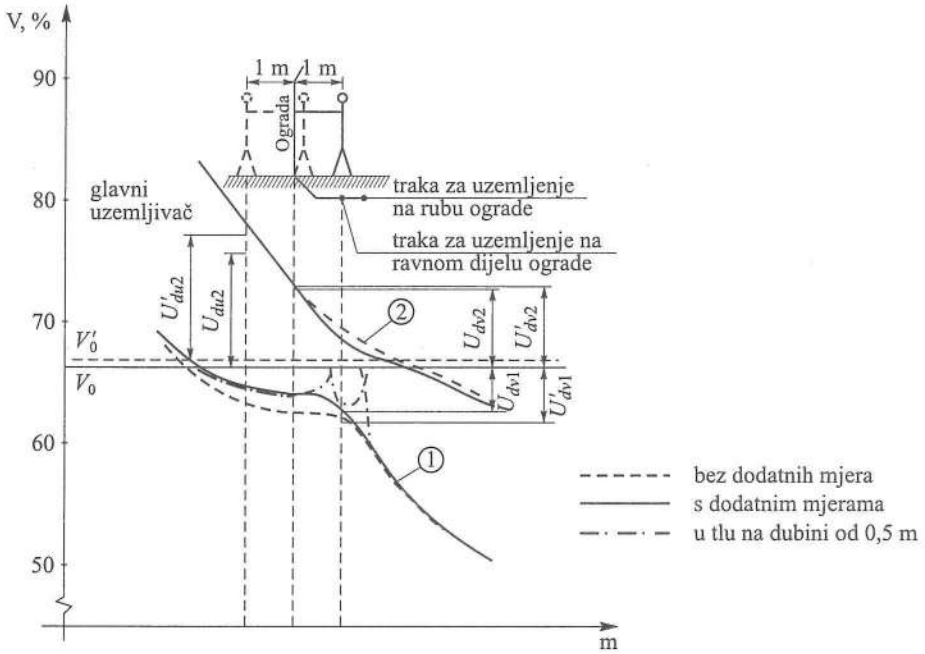
U [L6, L7] utvrđen je znatan učinak izjednačenja potencijala na rubovima ograde, koji nastaje zbog toga što traka uzemljivača ograde ima na rubovima viši potencijal od bliskih točaka okolnog tla. Da bi se pojačao učinak izjednačenja potencijala, tj. postiglo daljnje povećanje vrijednosti potencijala točaka okolnog tla, na sva četiri ruba dodana je traka kao na slici 17.5–2.



Sl. 17.5–2. Detalj polaganja dodatne trake za oblikovanje potencijala na rubnim dijelovima ograde.

Na slici 17.5–3 prikazana je raspodjela potencijala i odgovarajući dodirni naponi duž pravaca 1 i 2 za slučaj izjednačenja potencijala prema slici 17.5–1. Zbog usporedbe prikazani su i odgovarajući rezultati proračuna za uzemljivač sa slike 17.5–1, tj. za uzemljivač bez primijenjenih mjera.

Primjenom navedene mjere izjednačenja potencijala smanjio se vanjski dodirni napon na uglu ograde za oko 25,2 % (pravac 1). Međutim, zbog smanjenja potencijala ograde (od V_0' na V_0) došlo je do povećanja apsolutne vrijednosti negativnoga dodirnog napona za oko 2,8 % i negativnog unutarnjeg napona dodira za oko 2,0 % na sredini ograde (pravac 2). Očit je znatan učinak ove mjere.



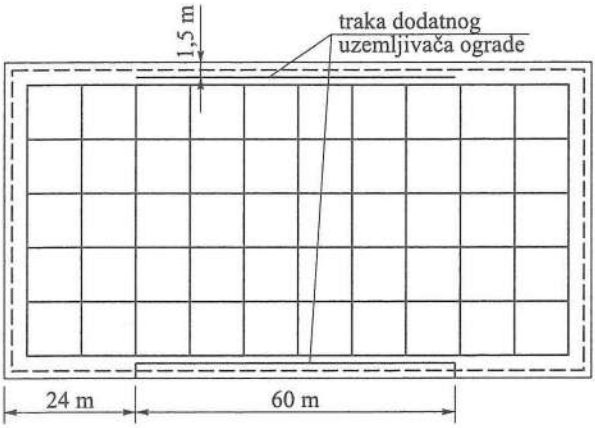
Sl. 17.5–3. Izjednačenje potencijala na rubovima ograde – raspodjela potencijala i naponi dodira duž odabranih pravaca.

17.5.2. Izjednačenje potencijala na srednjim dijelovima ograde

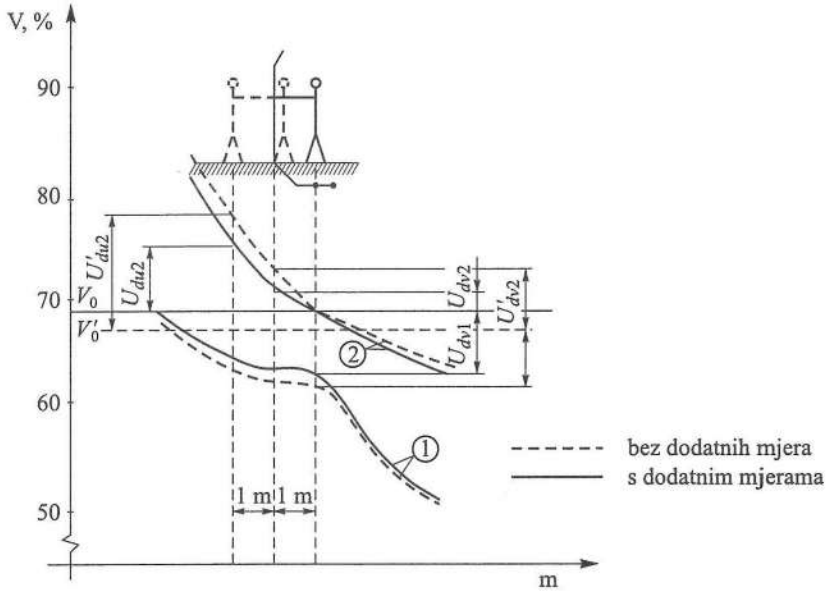
Na osnovi krivulja raspodjele potencijala na srednjim dijelovima ograde danim u [L6, L7] razvijen je zgodan način izjednačenja potencijala na srednjim dijelovima dodavanjem trake za uzemljenje ograde, slika 17.5–4, polaganjem dodatnoga trakastog uzemljivača na duljini od 60 m i na 1,5 m od ograde prema mrežastom uzemljivaču.

Na slici 17.5–5 prikazana je raspodjela potencijala duž pravaca 1 i 2 za slučaj polaganja dodatnoga trakastog uzemljivača s izjednačenjem potencijala kako je to prikazano na slici 17.5–4.

Došlo je do smanjenja apsolutne vrijednosti vanjskoga (oko 44,3 %) i unutarnjega (oko 30,6 %) dodirnog napona ograde na sredini (pravac 2). Međutim, istodobno je došlo do povećanja vanjskoga dodirnog napona na rubu za oko 11,1 % (pravac 1) zbog čega je došlo do povećanja potencijala ograde (za oko 2,8 %).



Sl. 17.5–4. Dodatna traka za izjednačenje potencijala na srednjim dijelovima ograde.



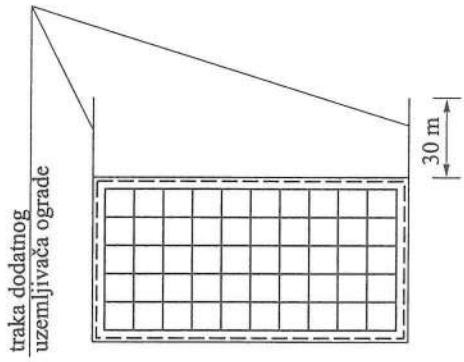
Sl. 17.5–5. Izjednačenje potencijala na srednjim dijelovima ograde – raspodjela potencijala i dodirni naponi duž odabranih pravaca.

17.5.3. Smanjenje potencijala ograde

Smanjenjem potencijala ograde smanjuju se pozitivni dodirni naponi na rubovima, ali se povećavaju (apsolutno) negativni dodirni naponi na srednjim odnosno uvučenim dijelovima ograde. Povećanjem potencijala ograde nastaje suprotan učinak. S obzirom na to da je uzemljivač ograde pasivna elektroda, položaj pojedinih dijelova tog uzemljivača bitno utječe na potencijal ograde. Potencijal ograde ovisi o

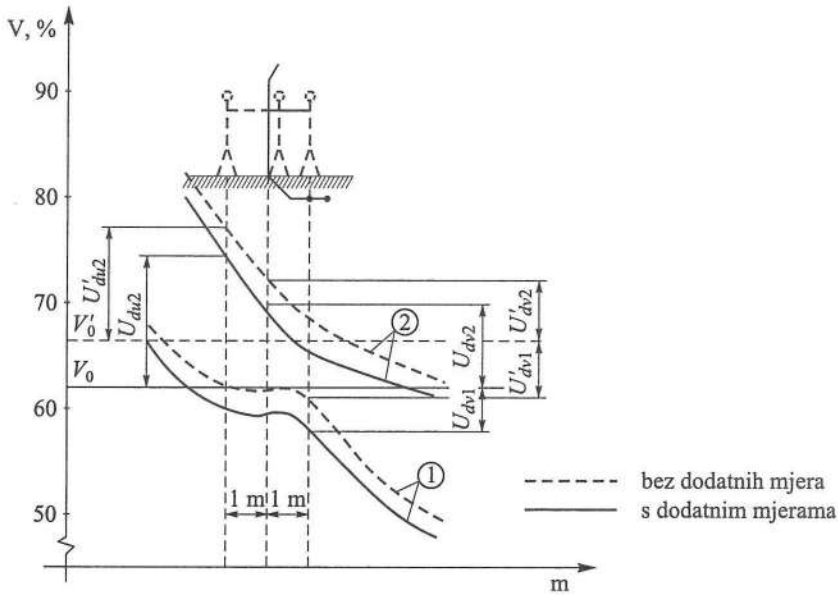
odnosu otpora između glavnog uzemljivača i uzemljivača ograde te otpora između uzemljivača ograde i udaljenih točaka neutralna tla. Pojednostavnjeno gledano, dodaje li se traka u tlu s točkama nižeg (višeg) potencijala od potencijala ograde, dolazi do smanjivanja (povećavanja) potencijala ograde.

Na slici 17.5–6 prikazan je detalj polaganja dodatne trake za smanjenje potencijala ograde.



Sl. 17.5–6. Dodatna traka za smanjenje potencijala ograde.

Na slici 17.5–7 prikazana je raspodjela potencijala i dodirni naponi duž odabranih pravaca za slučaj mjere primijenjene na slici 17.5–6.



Sl. 17.5–7. Raspodjela potencijala i dodirnog napona duž odabranih pravaca za slučaj smanjenja potencijala ograde polaganjem dodatne trake.

Postignuto je smanjenje potencijala ograde od oko 6,8 %, te smanjenje vanjskoga dodirnog napona na rubu od oko 21,9 %. Pri tome je došlo do povećanja apsolutne vrijednosti vanjskoga (oko 28,5 %) te unutarnjega (oko 20,4 %) dodirnog napona na sredini.

Primjer na slici 17.5–6 značajan je i zato što se takvi slučajevi često pojavljuju u praksi, a o njihovom djelovanju obično se ne vodi računa. Taj primjer značajan je i zbog pojave najveće apsolutne vrijednosti vanjskoga dodirnog napona na sredini uz samu ogradu, a ne na rubu ograde [22]. Navedena je razlika u promatranom primjeru iznosila čak oko 94 %.

Kao primjer povećanja potencijala ograde može poslužiti primjer na slici 17.5–4.

17.5.4. Kombinirane mjere

Koja se od navedenih mjera primjenjuje, ovisi o tome da li je potrebno smanjiti pozitivni ili negativni dodirni napon ograde.

Naravno da se mogu praviti i kombinacije tih mjera. U slučaju kombinacije mjere za izjednačenje potencijala na rubnim dijelovima (v. sl. 17.5–2) i mjere za izjednačenje potencijala na srednjim dijelovima (v. sl. 17.5–4) dolazi do smanjenja vanjskoga dodirnog napona na rubu za oko 17,6 %, te do smanjenja apsolutne vrijednosti vanjskoga dodirnog napona za oko 42,2 % i unutarnjega dodirnog napona za oko 28,3 % na sredini ograde. Pri tome dolazi do povećanja potencijala ograde za oko 2,2 %.

Važno je napomenuti da su detalji pojedinih mjera u tom razmatranju određeni približnom procjenom, zbog zgodne ilustracije, te da sigurno postoje i bolja rješenja koja treba utvrditi posebno za svaki uzemljivač. Također treba voditi računa o tome da naši propisi [16] dopuštaju veće vrijednosti dodirnog napona s unutarnje strane ograde nego s vanjske.

17.5.5. Napuci za smanjenje dodirnog napona na ogradi elektroenergetskog postrojenja

Nakon izvršene analize dolazi se do sljedećih zaključaka za slučaj galvanski odvojene ograde od glavnog uzemljivača:

- Postoji mogućnost dodatnog oblikovanja i smanjenja dodirnog napona ograde ukopavanjem dodatne trake.
- Na kritičnim mjestima (rubovi i srednji odnosno uvučeni dijelovi ograde pri uobičajenim izvedbama uzemljivača) može se provesti učinkovito oblikovanje potencijala. Također se može smanjivati ili povećavati potencijal ograde.
- U praksi se često pojavi slučaj postavljanja dodatnih krakova ograde (npr. uz put, potok i sl.), koji su galvanski spojeni s glavnom ogradom postrojenja te su uzemljeni. Ovdje je važno uočiti učinak dodatnog smanjenja potencijala ograde, što dalje ima za posljedicu sniženje pozitivnih dodirnih napona (obično na rubo-

vima) uz istodobno povećanje apsolutnih vrijednosti negativnih dodirnih napona (obično na srednjim, odnosno uvučenim dijelovima ograde).

- Važno je obratiti pozornost na to da pojedina mjera, pored poboljšanja prilika na jednom dijelu, može djelovati na pogoršanje prilika na drugom dijelu ograde.

Literatura

[L2] *Bestimmungen für Erdungen in Wechselstromanlangen über 1 kV*, VDE 0141/7.76

[L3] Nahman, J., Jelovac, D.: *Analiza međusobnog uticaja uzemljivača*, XIII savjetovanje CIGRE, Bled, 1977.

[L4] Kurtović, M., Miloš, G., Milun, D.: *Analiza međusobnog uticaja glavnog uzemljivača i uzemljivača ograde električnog postrojenja*, Savjetovanje o prenosu električne energije, Ohrid, 1978.

[L5] Galek, I.: *Analiza dodirnog napona i načina uzemljenja ograde elektroenergetskog postrojenja*, Elektrotehnika, br. 1–2, 1984.

[L6] Zelić, I., Medić, I.: *Analiza utjecaja položaja uzemljivača ograde postrojenja na raspodjelu potencijala u okolnom tlu*, Elektrotehnika, 1–2, 1986.

[L7] Zelić, I.: *Analiza napona dodira neuzemljene i uzemljene ograde elektroenergetskog postrojenja*, Elektrotehnika, 1–2, 1986.

18. PRORAČUN RAZDIOBE POTENCIJALA I IZNOŠENJE POTENCIJALA U INSTALACIJU NISKOG NAPONA NA PRIMJERU ZAJEDNIČKOGA I ODVOJENOGA RADNOG I ZAŠTITNOG UZEMLJENJA TS *X*/0,4 kV

Transformacija srednjeg napona u niski napon pretežno je je izvedena s 10/0,4 kV ili 20/0,4 kV, a u znatno manjem broju primjera s 6,3/0,4 kV i iznimno s 35/0,4 kV. Problematika nastajanja potencijala na zaštitnom uzemljivaču pri nastanku zemljospoja na postrojenjima visokog napona u transformatorskoj stanici koja transformira srednji napon u niski napon ista je za sve navedene transformacije te će se ta transformacija općenito označiti s TS *X*/0,4 kV. Najveći su problemi da se ne prekorači dopušteni dodirni napon i napon koraka te iznošenje potencijala u instalaciju niskog napona pri združenom uzemljenju TS *X*/0,4 kV.

Ako radni uzemljivač nule zvjezdišta transformatora na niskom naponu nije galvanski odvojen od zaštitnog uzemljivača, napon uzemljivača pri kvarovima u mreži visokog napona, istodobno je i dodirni napon u mreži niskog napona i u instalacijama potrošača.

Zaštitni uzemljivač u sredonjenaponskoj mreži projektira se zbog zadovoljenja uvjeta dopuštenoga dodirnog napona i napona koraka za zemni spoj na TS *X*/0,4 kV. Da bi se pri kvarovima u srednjonaponskoj mreži spriječilo prenošenje potencijala uzemljenja TS *X*/0,4 kV u mrežu niskog napona, potrebno je u pojedinim slučajevima odvojiti radno uzemljenje mreže niskog napona od zaštitnog uzemljenja TS *X*/0,4 kV.

U urbaniziranim i industrijaliziranim područjima katkad je, zbog nedovoljnog prostora i postojanja mnogih metalnih instalacija u tlu, nemoguće učinkovito odvojiti radno od zaštitnog uzemljenja, pa uvjeti uzemljenja TS srednji/niski napon često

odlučujuće utječu na koncepciju uzemljenja neutralne točke i zemljospojne zaštite srednjonaponske mreže.

Smatra se da su učinkovito razdvojeni zaštitni i radni uzemljivač, ako se na radnom uzemljivaču ne može pojaviti potencijal veći od 40 % potencijala zaštitnog uzemljivača, s tim što uzemljivači trebaju biti međusobno udaljeni najmanje 20 metara [41].

U postojećoj praksi mjerodavne karakteristične veličine uzemljenja TS srednji/ /niski napon određuju se bez uračunavanja međusobnog utjecaja uzemljivača, utjecaja provodnih omotača kabela (osim kod združenog uzemljivača) i utjecaja drugih metalnih instalacija koje se mogu naći u tlu u blizini uzemljivača TS *X*/0,4 kV. Spomenuti utjecaji mogu bitno promijeniti karakteristične veličine uzemljenja TS *X*/0,4 kV u gradskim i industrijskim mrežama i utjecati na izbor uzemljivača, pa i same koncepcije zaštite od električnog udara u TS *X*/0,4 kV i u niskonaponskoj mreži.

U ovom su razmatranju korišteni matematički modeli kojima se pri proračunu karakterističnih veličina uzemljenja na računalu mogu obuhvatiti navedeni utjecaji. Dana je, također, analiza karakterističnih veličina uzemljenja za tipični zaštitni i tipični radni uzemljivač TS *X*/0,4 kV u svim za praksu zanimljivim međusobnim odnosima i prema referentnoj zemlji.

Analiza utjecaja izračunana je u ovisnosti o njihovoj međusobnoj udaljenosti, o kojoj najviše i ovisi. Računalni programi mogu se upotrijebiti i za izračunavanje utjecaja duljine i presjeka elemenata uzemljivača, njihove dubine ukopa, otpornosti tla i struje zemljospoja. Na kraju je izvršena eksperimentalna provjera pojedinih rezultata u elektrolitskoj kadi na modelima za koje raspoloživa kada nije bila previše malih dimenzija. Dobiveni rezultati mogu se upotrijebiti pri projektiranju zaštitnih i radnih uzemljivača TS *X*/0,4 kV.

18.1. ANALIZA UVJETA UZEMLJENJA TS *X*/0,4 kV PRIMJENOM RAČUNALA I MJERENJE U ELEKTROLITSKOJ KADI

Uporabom matematičkih modela i jednadžbi danih u ovom razmatranju i dijelom u [L2] analizirani su na računalu IBM 1130 uvjeti uzemljenja za tipični zaštitni uzemljivač i tipični radni uzemljivač TS *X*/0,4 kV pri njihovim različitim međusobnim odnosima koji se susreću u praksi.

Analiza je izvršena pri određenoj struji zemljospoja, otpornosti tla, dubini ukopa i duljini i presjeku uzemljivača. Programom na računalu obuhvaćeno je izračunavanje:

- vlastitih i međusobnih otpornosti svih elemenata uzemljivača
- struja koje se odvode u tlo sa svih elemenata (određuje se i trenutačni smjer struje)
- napona uzemljivača

- otpora uzemljenja pojedinih uzemljivača i međusobni otpori uzemljenja
- ekvivalentnih otpora uzemljenja
- raspodjele potencijala po izabranim pravcima
- najviše potencijalne razlike napona koraka i mjesta gdje se pojavljuje
- potencijalne razlike dodirnog napona iznad središta zaštitnog uzemljivača.

U svim slučajevima za koje je izvršena analiza uzemljenja uzeto je: struja odvoda u tlo $I_z = 1000$ A, otpornost tla $\rho_z = 100$ Ωm, dubina ukopa uzemljivača $h = 0{,}7$ m. U izračunu dane su samo najvažnije veličine uzemljivača i dijagrami raspodjele potencijala po odabranim pravcima u ovisnosti o međusobnim udaljenostima i odnosima.

Pokazalo se da je izračunane karakteristične veličine uzemljivača najlakše eksperimentalno provjeriti u elektrolitskoj kadi jer se u nju uzemljivači mogu relativno lako postaviti na potrebnu udaljenost i tražene međusobne odnose. Metoda mjerenja nije opisana, a dani su samo rezultati mjerenja raspodjele potencijala. Dobiveno je dobro slaganje izmjerenih i računski ispravljivih izmjerenih veličina [L5] s izračunantim vrijednostima.

18.2. ZAŠTITNI I RADNI UZEMLJIVAČI

Za dva uzemljivača a i b bilo kojeg oblika, koji su sastavljeni od n_a i n_b pravocrtnih elemenata, vrijede Maxwellove jednadžbe [L2]

$$\begin{bmatrix} \overline{u}_a \\ \dots \\ \overline{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{R}_{aa} & \vdots & \overline{R}_{ab} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \overline{R}_{ba} & \vdots & \overline{R}_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \dots \\ \overline{i}_b \end{bmatrix} \tag{18.2–1}$$

gdje su:

$\overline{u}_a, \overline{u}_b$ matrice (stupci) napona elemenata uzemljivača s n_a i n_b članova prema beskonačno udaljenoj zemlji koja se nalazi na nultom potencijalu neutralne zemlje

$\overline{R}_{aa}, \overline{R}_{bb}$ kvadratne simetrične matrice s $n_a \times n_a$ i $n_b \times n_b$ članova u kojima su u glavnim dijagonalama vlastite otpornosti elemenata uzemljivača a i b s uračunanim likom, ostali su članovi međusobne otpornosti elemenata uzemljivača a i međusobne otpornosti elemenata uzemljivača b s uračunanim likom,

$\overline{R}_{ab}, \overline{R}_{ba}$ pravokutne matrice s $n_a \times n_b$ članova koji predstavljaju međusobne otpornosti elemenata uzemljivača a i uzemljivača b s uračunanim likom

$\overline{i}_a, \overline{i}_b$ matrice (stupci) struja koje se odvode s elemenata uzemljivača a i b s n_a i n_b članova.

Pri proračunu karakterističnih veličina uzemljivača mogu se zanemariti padovi napona na elementima uzemljivača, jer su mali na elementima male duljine (dulji elementi uzemljivača uvijek se mogu podijeliti na više kraćih), i uzeti da se svi elementi uzemljivača nalaze na istom potencijalu:

$$\left[\overline{u}_a\right]=\left[\overline{1}_a\right]\cdot u_a \qquad \left[\overline{u}_b\right]=\left[\overline{1}_b\right]\cdot u_b \tag{18.2–2}$$

gdje su:

$\overline{1}_a$, $\overline{1}_b$ matrice (jedinični vektori) s n_a i n_b članova.

Pri proračunu uzima se da je:

$$\overline{R}_{ba} = \overline{R}_{ab} \tag{18.2–3}$$

Karakteristični parametri dvaju bliskih uzemljivača i njihov međusobni utjecaj proučava se u uvjetima kada se s nekog od njih odvodi struja zemljospoja I_z:

$$I_z = \left[\overline{1}_a\right]^T \cdot \left[\overline{i}_a\right] \quad \text{ili} \quad I_z = \left[\overline{1}_b\right]^T \cdot \left[\overline{i}_b\right] \tag{18.2–4}$$

Ako su uzemljivači spojeni zemljovodnim užetom ili kabelom, struja zemljospoja I_z odvodi se istodobno s oba:

$$I_z = \left[\overline{1}_{a+b}\right]^T \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \cdots \\ \overline{i}_b \end{bmatrix} \tag{18.2–5}$$

Da bismo izračunali karakteristične veličine obaju uzemljivača i njihov međusobni utjecaj, treba odrediti struje svih elemenata uzemljivača ($\overline{i}_a$ i $\overline{i}_b$) i napone obaju uzemljivača (u_a i u_b), odnosno $n_a + n_b + 2$ nepoznatih veličina. Jednadžbe (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–5) daju ukupno $n_a + n_b + 1$ jednadžbu. Za potpuno definiranje sustava dvaju uzemljivača nedostaje jedna jednadžba. Ona proizlazi iz međusobnog odnosa promatranih uzemljivača i njihovog odnosa prema drugim uzemljenim objektima, okolnom tlu i referentnoj zemlji.

Za praksu su od posebnog interesa četiri slučaja:

18.2.1. Galvanski odvojeni uzemljivači

Ako uzemljivači nisu međusobno spojeni metalnim vodičima niti su u spoju s bilo kakvim vodljivim dijelovima iz okolnog tla, onda su galvanski odvojeni.

Kada se struja zemljospoja odvodi sa zaštitnog uzemljivača (uzemljivač a), onda je prema Kirchhoffovom zakonu zbroj struja svih elemenata radnog uzemljivača (uzemljivač b) jednak nuli:

$$\left[\overline{1}_b\right]^T \cdot \left[\overline{i}_b\right] = 0 \tag{18.2–6}$$

Jednadžbe (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–6) tvore sustav od $n_a + n_b + 2$ linearnih jednadžbi iz kojih se mogu izračunati naponi uzemljivača i struje svih elemenata obaju uzemljivača, a time i ostale važnije veličine uzemljivača.

18.2.2. Radni uzemljivač na nultom potencijalu

Ako je radni uzemljivač neutralnim (nultim) vodičem, vodljivim omotačima kabela ili pocinčanim trakama učinkovito spojen s drugim uzemljivačima i metalnim instalacijama u zemlji čija je ekvivalentna otpornost uzemljenja vrlo mala (gradska mreža), može se uzeti da je pri odvođenju struje s uzemljivača a napon uzemljivača b zanemarivo mali:

$$\left[\overline{u}_b\right] = \left[\overline{1}_b\right] \cdot u_b = 0 \qquad (18.2\text{–}7)$$

Jednadžbe (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–7) tvore sustav s dovoljnim brojem linearnih jednadžbi potrebnih za proračun napona, struja i ostalih veličina uzemljivača.

18.2.3. Međusobno spojeni uzemljivači

Ako su zaštitni i radni uzemljivači međusobno spojeni kabelom ili zemljovodnim užetom, oni čine jedan uzemljivač. Izračunavanje karakterističnih veličina uzemljivača moguće je uz uvjet:

$$u_a = u_b = u \qquad (18.2\text{–}8)$$

jer jednadžbe (18.2–1), (18.2–2), (18.2–5) i (18.2–8) čine potpuni sustav linearnih jednadžbi.

18.2.4. Galvanski odvojeni uzemljivači, a neizolirani vodljivi omotač kabela spojen sa zaštitnim uzemljivačem

Ako se neizolirani vodljivi omotač kabela spoji sa zaštitnim uzemljivačem, onda oni čine jedan uzemljivač. Ako se omotač kabela podijeli na n_c elemenata dovoljno male duljine, proračun napona, struja i drugih važnijih veličina uzemljivača može se izvesti kao za dva galvanski odvojena uzemljivača uporabom jednadžbi (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–6) ako se uzme da zaštitni uzemljivač ima $n_a + n_c$ elemenata.

18.3. GALVANSKI ODVOJENI ZAŠTITNI I RADNI UZEMLJIVAČI

Vodovod se pri proračunu računa kao treći uzemljivač. Za tri uzemljivača a, b i c bilo kojeg oblika, ako su sastavljeni od n_a, n_b i n_c pravocrtnih elemenata, vrijede Maxwellove jednadžbe:

$$\begin{bmatrix} \overline{u}_a \\ \dots \\ \overline{u}_b \\ \dots \\ \overline{u}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{R}_{aa} & \vdots & \overline{R}_{ab} & \vdots & \overline{R}_{ac} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{R}_{ba} & \vdots & \overline{R}_{bb} & \vdots & \overline{R}_{bc} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{R}_{ca} & \vdots & \overline{R}_{cb} & \vdots & \overline{R}_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \dots \\ \overline{i}_b \\ \dots \\ \overline{i}_c \end{bmatrix} \tag{18.3–1}$$

gdje je:

$\overline{u}_c$ matrica (stupac) napona elemenata vodiča uzemljivača s n_c članova nasuprot beskonačno udaljene zemlje koja se nalazi na nultom potencijalu

$\overline{R}_{cc}$ kvadratna simetrična matrica s $n_c \times n_c$ članova u kojoj su u glavnim dijagonalama vlastite otpornosti elemenata vodiča s uračunanim likom, ostali su članovi međusobne otpornosti elemenata vodiča s uračunanim likom,

$\overline{R}_{ac}, \overline{R}_{ca}$, pravokutne matrice s $n_a \times n_c$ članova koji predstavljaju međusobne otpornosti elemenata uzemljivača a i elemenata vodiča c,

$\overline{R}_{bc}, \overline{R}_{cb}$ pravokutne matrice elemenata uzemljivača b i elemenata $n_b \times n_c$ vodiča uzemljivača c

$\overline{i}_c$ matrica (stupac) struja koje se odvode s elemenata vodiča s n_c članova.

Očito je:

$$\overline{R}_{ca} = \overline{R}_{ac} \quad \text{i} \quad \overline{R}_{cb} = \overline{R}_{bc} \tag{18.3–2}$$

Sustav jednadžbi (18.3–1) može se riješiti, ako se računa s jednadžbama (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–6) i ako se doda uvjet:

$$\left[\overline{u}_c\right] = \left[\overline{1}_c\right] \cdot u_c = 0 \tag{18.3–3}$$

što se može učiniti sa zanemarivo malom pogreškom.

18.4. ZAŠTITNI UZEMLJIVAČ I KABEL S NEIZOLIRANIM VODLJIVIM OMOTAČEM

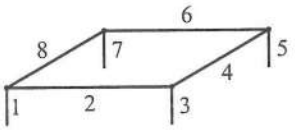
Ako se neizolirani vodljivi omotač kabela tretira kao uzemljivač i podijeli na određeni broj elemenata, matematički je model isti kao za dva uzemljivača. U praksi se susreću tri slučaja:

a) Uzemljivač i omotač kabela galvanski su odvojeni. Proračun veličina uzemljivača i omotača kabela može se analizirati uporabom jednadžbi (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–6).

b) Omotač kabela na nultom potencijalu. Problem se može riješiti uporabom jednadžbi (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–7).
c) Uzemljivač i omotač kabela međusobno spojeni. Rješenje je moguće ako se upotrijebe jednadžbe (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–8).
d) Zaštitni uzemljivač i bliski vodovod (s metalnim cijevima) na nultom potencijalu. Ako je vodovod od neizoliranih metalnih cijevi, može se promatrati kao zaseban uzemljivač, pa se rješenje dobiva uporabom jednadžbi (18.2–1), (18.2–2), (18.2–4) i (18.2–7). Ukupna duljina vodovoda dijeli se na više odsječaka (elemenata) dovoljno male duljine.

18.5. TIPIČNI ZAŠTITNI I TIPIČNI RADNI UZEMLJIVAČ

Odabran je tipični zaštitni uzemljivač TS X/0,4 kV, slika 18.5–1, s osam elemenata sastavljen od željeznih pocinčanih traka 25 mm × 4 mm duljine po 8 m i željeznih pocinčanih štapova (sondi) duljine 2 m i promjera $d = 2{,}5'' = 0{,}064$ m.

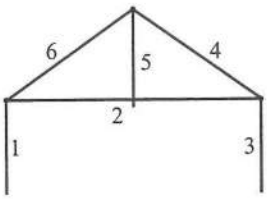


Sl. 18.5–1. Tipični zaštitni uzemljivač TS X/0,4 kV.

U analizi uvjeta uzemljenja taj se uzemljivač upotrebljava i za izračunavanje referentnih veličina i raspodjele potencijala, ako u njegovoj blizini nema drugih uzemljivača ni vodljivih instalacija u tlu. Zbog simetrije mnoge su vlastite i međusobne otpornosti elemenata uzemljivača jednake, što se koristi u programu.

Tipični radni uzemljivač TS X/0,4 kV, slika 18.5–2, sa šest elemenata sastavljen je od pocinčanih traka duljine 4 m (ekvivalentnog promjera $d_e = 0{,}0185$ m), koje čine jednakostranični trokut i pocinčanih štapova duljine 2 m (promjera $d = 0{,}064$ m).

Kada postoje samo zaštitni i radni uzemljivači za praksu su zanimljiva tri njihova odnosa: uzemljivači galvanski odvojeni, radni uzemljivači na nultom potencijalu i združeno uzemljenje, tj. spojeni radni i zaštitni uzemljivač.



Sl. 18.5–2. Tipični radni uzemljivač TS X/0,4 kV.

18.6. UZEMLJIVAČI GALVANSKI ODVOJENI

Radni uzemljivač galvanski se odvaja od zaštitnoga, ako uzemljivač ne ispunjava uvjete bezopasnosti u TS X/0,4 kV ili u niskonaponskoj mreži.

Analiza je napravljena u ovisnosti o udaljenosti težišta uzemljivača A_1 (udaljenost geometrijske sredine radnog od zaštitnog uzemljivača) pod uvjetom da se struja odvodi sa zaštitnog uzemljivača i ako u njihovoj blizini nema drugih uzemljivača ni metalnih instalacija. U praksi se takav slučaj javlja u izoliranim ili kompenziranim mrežama u kojima nije osigurano brzo otklanjanje jednofaznih zemljospojeva, a najčešće u seoskim i prigradskim zračnim mrežama. Napisan u matričnom obliku (pripremljen za računalo), sustav je jednadžbi koji omogućuje potrebna izračunavanja:

$$\begin{bmatrix} \overline{R}_{aa} & \overline{R}_{ab} & -\overline{1}_a & \overline{0} \\ \overline{R}_{ba} & \overline{R}_{bb} & \overline{0} & -\overline{1}_b \\ \overline{1}_a^t & \overline{1}_b^t & \overline{0} & \overline{0} \\ \overline{0} & \overline{1}_b^t & \overline{0} & \overline{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \overline{i}_b \\ \overline{u}_a \\ \overline{u}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{0} \\ I_z \\ \overline{0} \end{bmatrix} \qquad (18.6\text{–}1)$$

Važnije veličine uzemljivača dobivene rješavanjem (18.6–1) dane su u tablici 18.6–1 u ovisnosti o udaljenosti težišta uzemljivača A_1, a dijagrami raspodjele potencijala, izračunani i izmjereni, na površini tla na pravcu $0 - x$ na slici 18.6–1.

Tablica 18.6–1. Važnije karakteristične veličine zaštitnog i radnog uzemljivača, ako su galvanski odvojeni, u ovisnosti o udaljenosti njihovih težišta A.

A_1, m	7	14	21	28	Zaštitni uzemljivač sam
U_a, V	5183,265	5259,693	5261,860	5262,234	5262,625
U_b, V	2595,849	1182,200	773,443	575,970	–
U_b/U_a, %	50,08	22,47	14,64	10,44	–
R_z, Ω	5,183	5,259	5,261	5,262	5,262
U_{da}, V	1999,654	2035,424	2035,723	2035,894	2036,283
$U_{k\,\text{maks}}$, V	785,582	615,301	613,817	613,659	613,470
X_1, m	4,20	4,40	4,40	4,40	4,40
X_2, m	5,20	5,40	5,40	5,40	5,40

X_1, X_2 udaljenost točaka na površini tla u pravcu 0–X od središta zaštitnog uzemljivača između kojih je najveći napon koraka, m

U_{da} dodirni napon iznad težišta zaštitnog uzemljivača, m

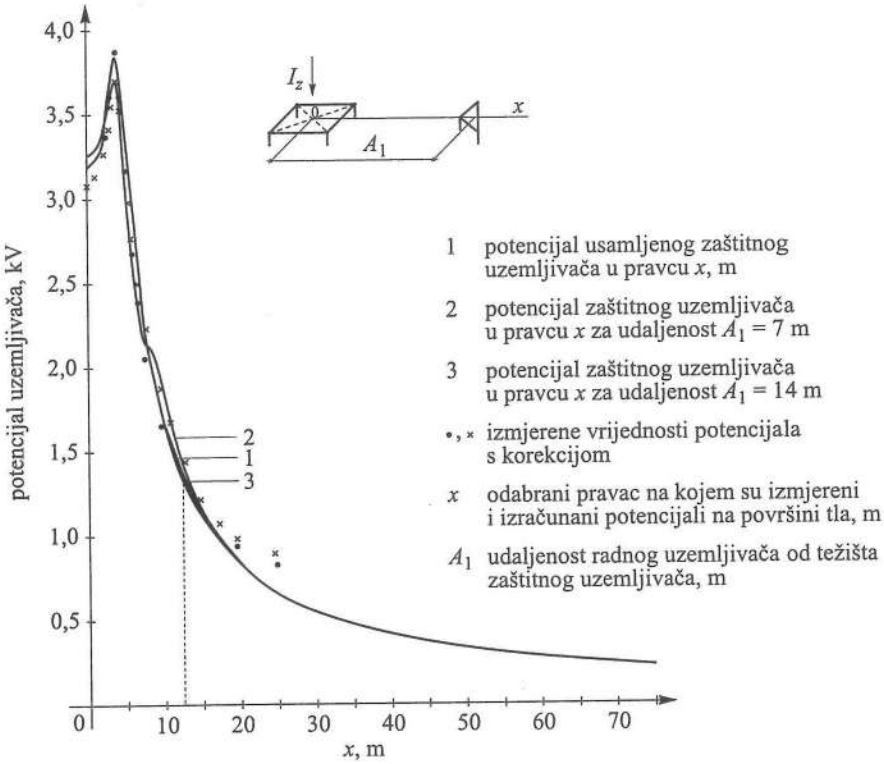
$U_{k\,\text{maks}}$ najveći napon koraka na pravcu 0–X, V

U_a napon zaštitnog uzemljivača, V

U_b napon radnog uzemljivača, V

R_z otpor uzemljenja zaštitnog uzemljivača, Ω

D_a dijagonala zaštitnog uzemljivača, m

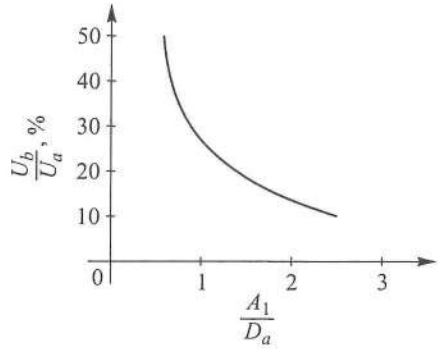


Sl. 18.6–1. Izračunana i računski korigirana izmjerena raspodjela potencijala na površini tla, ako je zaštitni uzemljivač sam i ako su uzemljivači galvanski odvojeni.

Točno izračunavanje napona radnog uzemljivača U_b u ovisnosti o naponu zaštitnog uzemljivača U_a i o njihovoj međusobnoj udaljenosti A_1 iznimno je važno jer se napon radnog uzemljivača posredstvom nultog vodiča prenosi u niskonaponsku mrežu. Zato se moraju poduzeti mjere da bi postao manji od dopuštenoga dodirnog napona u niskonaponskoj mreži (ovisi o primijenjenom sustavu zaštite u mreži niskog napona).

Ako je poznat potencijal zaštitnog uzemljivača, dijagram na slici 18.6–2 može poslužiti za određivanje potrebne udaljenosti zaštitnoga i radnog uzemljivača, tako da je napon radnog uzemljivača manji od dopuštenog dodirnoga napona u niskonaponskoj mreži.

Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadajućih TS traži da se mjerenjem (naravno prije izgradnje) utvrdi koliko su uzemljivači galvanski učinkovito odvojeni. Smatra se da su učinkovito odvojeni ako se na jednom uzemljivaču ne može pojaviti potencijal veći od 40 % potencijala drugog uzemljivača, s tim što uzemljivači trebaju biti međusobno udaljeni najmanje 20 m. Iz dijagrama na slici 18.6–2 vidi se da radni uzemljivač preuzima samo 10 % potencijala zaštitnog uzemljivača kada je od njega udaljen 20 m.



Sl. 18.6–2. Omjer napona radnog i zaštitnog uzemljivača u postocima u ovisnosti o omjeru udaljenosti radnog uzemljivača A_1 od dijagonale zaštitnog uzemljivača D_a.

18.7. RADNI UZEMLJIVAČ NA NULTOM POTENCIJALU

Ako su u gradskoj distribucijskoj ili industrijskoj mreži uzemljivači galvanski odvojeni, radni je uzemljivač neutralnim vodičem i vodljivim neizoliranim omotačima niskonaponskih kabela neposredno vezan s vodovodom i drugim metalnim instalacijama u tlu preko mnogobrojnih veza u instalacijama potrošača. U takvim uvjetima može se računati da je radni uzemljivač TS na potencijalu referentne zemlje.

Zanemaren je utjecaj sustava uzemljenja mreže srednjeg napona.

Napisan u matričnoj formi matematički model čini sustav jednadžbi:

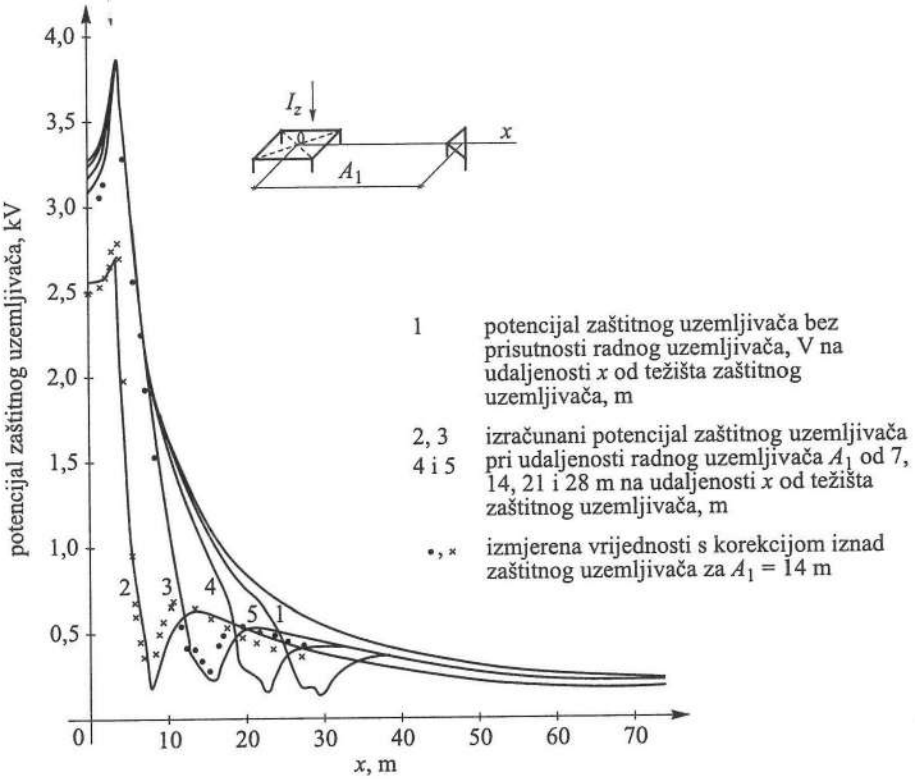
$$\begin{bmatrix} \overline{R}_{aa} & \overline{R}_{ab} & -\overline{1}_a \\ \overline{R}_{ba} & \overline{R}_{bb} & \overline{0} \\ \overline{1}_a^t & \overline{0} & \overline{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \overline{i}_b \\ \overline{u}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{0} \\ \\ I_z \end{bmatrix} \tag{18.7–1}$$

Tablica 18.7–1. Važnije karakteristične veličine zaštitnog uzemljivača, ako je radni uzemljivač na nultom potencijalu, u ovisnosti o udaljenosti njihovih težišta.

A_1, m	7	14	21	28	Zaštitni uzemljivač sam
U_a, V	4449,016	5118,828	5201,700	5228,883	5262,625
R_z, Ω	4,446	5,118	5,201	5,228	5,262
U_{da}, V	1906,017	2029,716	2034,404	2035,396	2036,283
$U_{k\,\text{maks}}$, V	1410,778	647,566	620,896	615,315	613,470
X_1, m	4,00	4,40	4,40	4,40	4,40
X_2, m	5,00	5,40	5,40	5,40	5,40

Važnije veličine uzemljivača izračunane u ovisnosti o udaljenosti težišta uzemljivača A_1 dane su u tablici 18.7–1, a dijagrami raspodjele potencijala, izračunani i

izmjereni, na površini tla na pravcu 0 – x na slici 18.7–1. Iz tablice 18.7–1 vidi se da blizina radnog uzemljivača utječe na smanjenje napona zaštitnog uzemljivača, ekvivalentne otpornosti rasprostiranja i potencijalne razlike dodira.

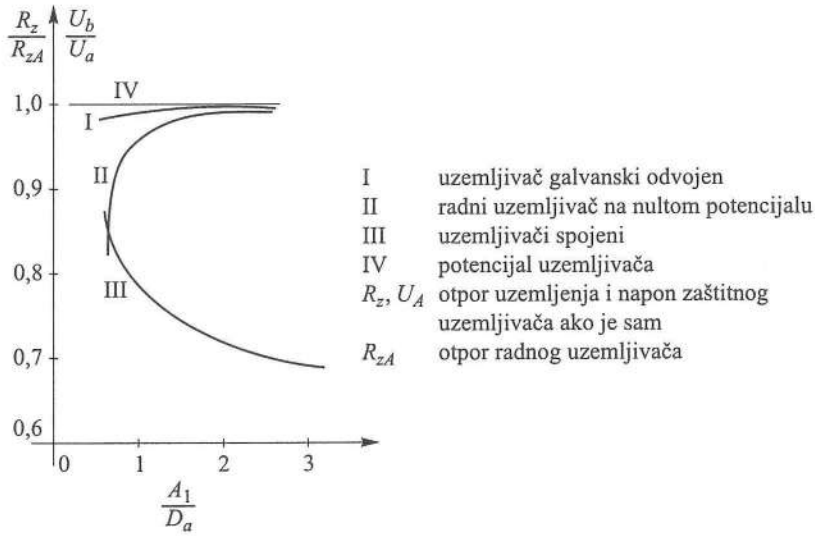


Sl. 18.7–1. Izračunana i računski ispravljena izmjerena raspodjela potencijala iznad zaštitnog uzemljivača na površini tla ako je radni uzemljivač na referentnoj zemlji.

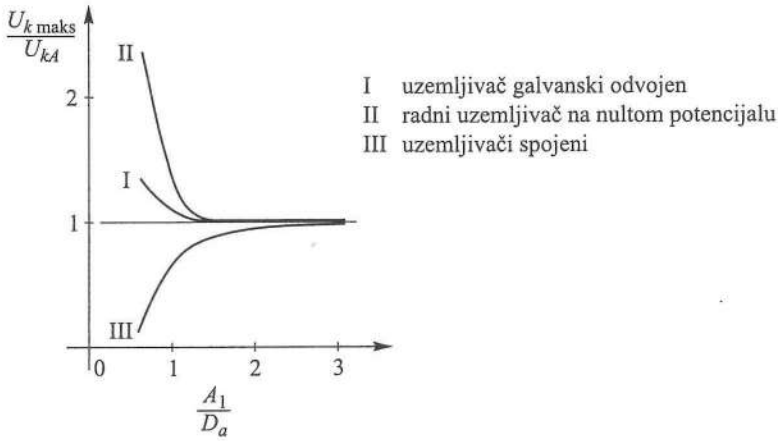
Utjecaj može biti znatan ako su uzemljivači vrlo blizu.

Utjecaj udaljenosti radnog uzemljivača A_1 na ekvivalentnu otpornost uzemljenja R_z dan je na slici 18.7–2 kao $R_z/R_{zA} = f(A_1/D_a)$. Budući da radni uzemljivač »dovodi« zemlju s nultim potencijalom blizu zaštitnog uzemljivača, raspodjela je potencijala nepovoljna i najveći napon koraka može biti mnogo veći od referentnog. Ako je A_1 = 7 m (fizička udaljenost uzemljivača: 0,54 m), napon koraka više je nego dvostruko veći.

Promjena najvećeg napona koraka $U_{k\,\mathrm{maks}}$ u ovisnosti o udaljenosti uzemljivača A_1 dana je kao $U_{k\,\mathrm{maks}}/U_{kA} = f(A_1/D_a)$ na slici 18.7–3 iz koje se vidi da je po kriteriju najvećih napona koraka dovoljna udaljenost uzemljivača $A_1/D_a \geq 1$.



Sl. 18.7–2. Ekvivalentni otpor uzemljenja.



Sl. 18.7–3. Potencijal koraka.

Izračunavanje napona jednog uzemljivača kada se struja odvodi u tlo s drugog uzemljivača koji se nalazi u njegovoj blizini može biti potrebno ako se u blizini elektroenergetskih postrojenja nalaze postrojenja HPT-a, RTV-a i drugih posebnih objekata.

Blizina radnog uzemljivača, međutim, nepovoljno utječe na raspodjelu potencijala na površini tla; između uzemljivača povećava gradijent potencijala, a time i najveći napon koraka, pri čemu je kritičan uzemljivač s kojega se odvodi struja. Iz slike 18.7–3 vidi se da je pri vrlo maloj fizičkoj udaljenosti uzemljivača najveći napon koraka znatno veći od referentnog, te da je neznatno veći ako se ispuni uvjet $A_1/D_a > 1$.

Sa stajališta zaštite od opasnoga dodirnog napona i napona koraka u trafostanici malo se dobiva ako je udaljenost uzemljivača $A_1/D_a > 1$. U konkretnom slučaju, dovoljna je udaljenost uzemljivača $A_1 = 14$ m, dok je fizička udaljenost nešto manja od 7 m.

Iz tablice 18.7–1 vidi se da su naponi dodira i koraka kritični na zaštitnom uzemljivaču.

18.8. MEĐUSOBNO SPOJENI UZEMLJIVAČI

U urbanim distribucijskim i industrijskim mrežama, ako nije moguće galvanski razdvojiti uzemljivače trafostanica, najbolje je izvesti združeno (ujedinjeno) uzemljenje, pri čemu treba osigurati brzo otklanjanje jednofaznih zemljospojeva. Treba projektirati samo jedan uzemljivač ili izvršiti spajanje postojećih odvojenih uzemljivača. Združeni uzemljivač mora zadovoljiti kriterij dopuštenih napona dodira i koraka u TS-u i kriterij bezopasnosti u pogledu dodirnog napona na objektima mreže niskog napona i u instalacijama potrošača. Ako su uzemljivači međusobno spojeni zemljovodnim užetom ili kabelom, oni čine jedan uzemljivač i struja se odvodi istodobno s oba. Analiza je izvršena u ovisnosti o udaljenosti njihovih težišta.

Napisan u matričnoj formi, matematički model čini sustav jednadžbi.

$$\begin{bmatrix} \overline{R}_{aa} & \overline{R}_{ab} & -\overline{1}_a \\ \overline{R}_{ba} & \overline{R}_{bb} & -\overline{1}_b \\ \overline{1}_a & \overline{1}_b & \overline{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{i}_a \\ \overline{i}_b \\ \overline{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{0} \\ I_z \end{bmatrix} \tag{18.8–1}$$

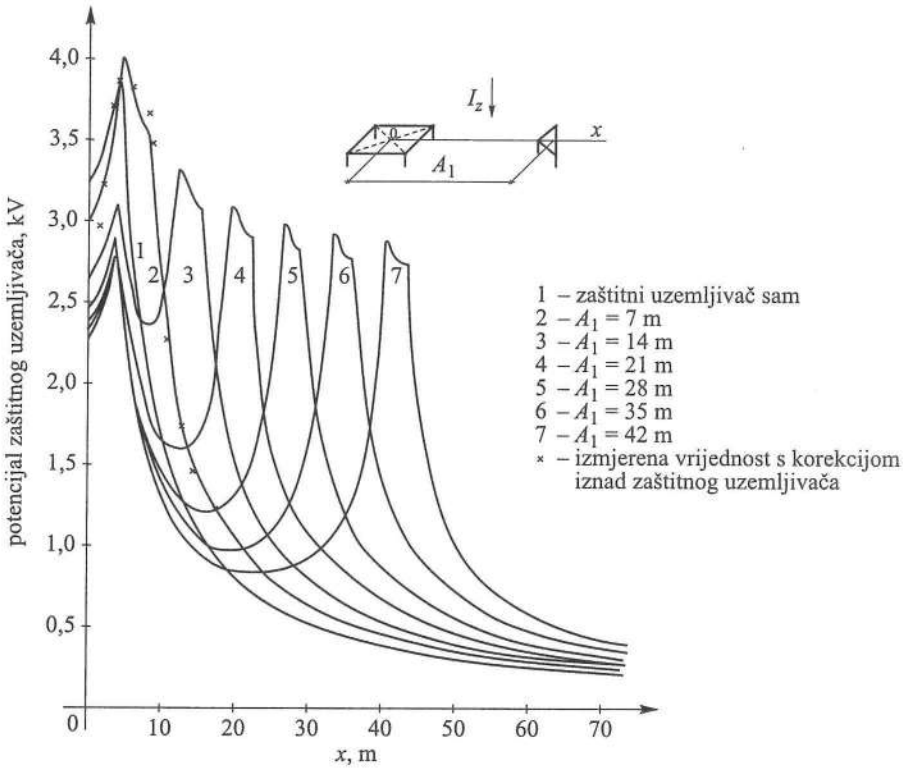
Zanemaren je utjecaj uzemljivača mreža srednjeg i niskog napona.

Izračunane veličine spojenih uzemljivača u ovisnosti o udaljenosti težišta uzemljivača A_1 dane su u tablici 18.8–1, a dijagrami raspodjele potencijala, izračunani i djelomično izmjereni, na površini tla na pravcu $0 - x$ na slici 18.8–1.

Tablica 18.8–1. Izračunane karakteristične veličine spojnih uzemljivača u ovisnosti o udaljenosti njihovih težišta.

A_1, m	7	14	21	28	35	Zaštitni uzemljivač sam
U_a, V	4450,124	3962,490	3786,906	3699,988	3648,148	5262,625
R_z, Ω	4,450	3,962	3,786	3,699	3,648	5,262
U_{da}, V	1444,771	1341,190	1322,734	1318,776	1318,199	2036,283
$U_{k\,\text{maks}}$, V	131,160	490,321	569,956	596,504	608,586	613,470
X_1, m	8,40	15,40	17,80	24,80	31,80	4,40
X_2, m	9,40	16,40	18,80	25,80	32,80	5,40

U – napon spojenoga radnog i zaštitnog uzemljenja, V



Sl. 18.8–1. Izračunana i računski korigirana izmjerena raspodjela potencijala na površini tla ako su uzemljivači spojeni.

Iz tablice 18.8–1 vidi se da su sve karakteristične veličine spojenih uzemljivača manje od referentnih. S povećanjem međusobne udaljenosti uzemljivača smanjuje se napon uzemljivača, ekvivalentna otpornost i dodirni napon. Najveći napon koraka mnogostruko je manji od referentnog ako su uzemljivači neposredno jedan uz drugi i raste s njihovom udaljenošću. Kritičan je uzemljivač čiji je otpor uzemljenja veći (u ovom slučaju radni uzemljivač) i to prvo vanjska pa unutarnja strana.

Promjena ekvivalentne otpornosti uzemljenja u ovisnosti o udaljenosti A_1 između središta uzemljivača dana je na slici 18.8–1 kao $R_z/R_{zA} = f(A_1/D_a)$, a promjena najvećeg napona koraka $U_{k\,\mathrm{maks}}$ u ovisnosti o udaljenosti A_1 od središta uzemljivača na slici 18.7–3 kao $U_{k\,\mathrm{maks}}/U_{kA} = f(A_1/D_a)$.

U uvjetima odvođenja struje sa spojenih uzemljivača između njih se pojavljuje potencijalna dolja (osjetno smanjenje potencijala zaštitnog uzemljivača) koja je to veća što su uzemljivači udaljeniji. Ako su uzemljivači iznimno blizu, potencijalna se dolja ne javlja, što je dobro jer bi se mogla pojaviti kao mogući (vrlo velik) potencijal dodira.

Rezultati analize pokazuju da je u TS-u najlakše ispuniti uvjete uzemljenja ako su uzemljivači spojeni. U gradskim kabelskim mrežama postoji velik broj TS-a čiji

su uzemljivači spojeni vodljivim omotačima visokonaponskih i niskonaponskih kabela, pocinčanim trakama i nultim vodičem. Uzemljivači mogu, također, biti spojeni i s mnogim drugim metalnim instalacijama u zemlji (vodovod, temeljni uzemljivači, armature raznih objekata), a napon tako združenog uzemljivača najčešće je vrlo malen, pa se i pri velikim strujama kvara u mreži mogu ispuniti uvjeti uzemljenja u niskonaponskoj mreži bez obzira na sustav zaštite koji je u njoj primijenjen.

Literatura

[L1] Nahman, J.: *Uzemljenje neutralne točke distributivnih mreža*, Naučna knjiga, Beograd, 1980.

[L2] Jelovac, D.: *Analiza međusobnog uticaja uzemljivača*, magistarski rad, Beograd, 1977.

[L3] Jelovac, D.: *Analiza međusobnog utjecaja tipičnog zaštitnog i tipičnog radnog uzemljivača distributivnih TS 20(10)/0,4 kV*, JUKO CIGREB, Sarajevo, 1979.

[L4] Vujović, O.: *Modeliranje uzemljivača u elektrolitskoj kadi*, Elektrotehnika, Zagreb, 1984.

19. POSEBNI UZEMLJIVAČI

19.1. UZEMLJIVAČI VELIKE DULJINE

Među uzemljivače velike duljine spadaju, primjerice, cjevovodi, kabelski plaštevi i tračnice na koje su priključeni uzemljivači visokog napona i druge infrastrukturne instalacije položene u zemlju i spojene na sustav uzemljenja. Takvi uzemljivači mogu osjetno poboljšati kakvoću uzemljenja, a u isto vrijeme mogu biti uzrok opasnim naponima uzemljivača s iznošenjem potencijala u dosta široku okolinu i izvan postrojenja visokog napona. To posebno dolazi do izražaja kod izravno uzemljene nulte točke transformatora. Zbog duljine takvih uzemljivača, u obzir se mora uzeti i utjecaj djelatnog otpora uzemljivača (a ne samo tla). Stoga je njihov otpor uzemljenja razmjerno veći. Računat ćemo ga po sljedećem postupku.

Najprije se izračuna otpor uzemljenja od 1 km duljine uzemljivača R_{1z} (Ω/km), a zatim pripadajuću vodljivost g_{1z} (S/km):

$$g_{1z} = \frac{1}{R_{1z}} \tag{19.1–1}$$

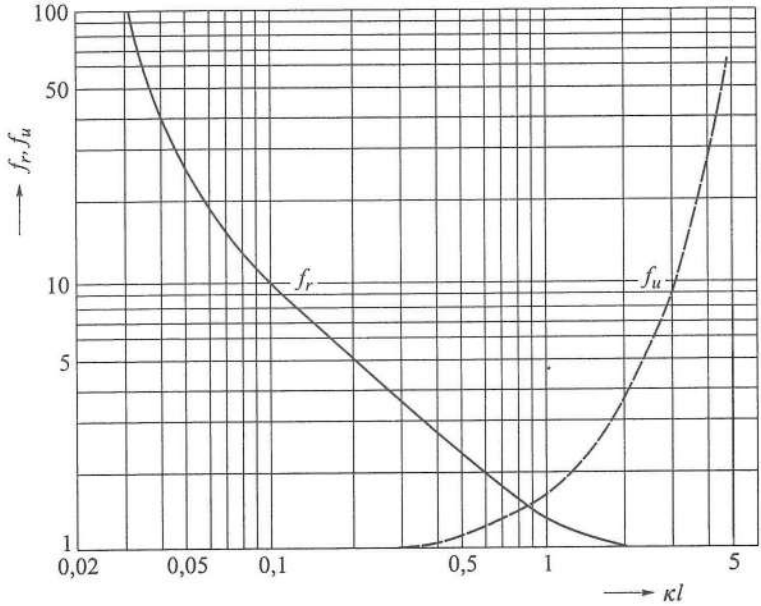
gdje je:

- R_{1z} otpor uzemljenja uzemljivača, ne uzima se u obzir vlastiti otpor, Ω/km
- g_{1z} vodljivost uzemljivača, S/km
- r_1 djelatni otpor vodiča uzemljivača, Ω/km
- R_{vz} stvarni otpor uzemljenja u kojem je obuhvaćen djelatni otpor vodiča uzemljivača r_1 i otpor uzemljenja uzemljivača R_{1z}.

Potom se izračuna faktor κ:

$$\kappa = \sqrt{g_{1z} \cdot r_1} \tag{19.1–2}$$

a zatim produkt κl, gdje je: l duljina uzemljivača u km. Sa slike 19.1–1 očita se faktor f_r u ovisnosti o produktu κl. Iz tako dobivenih podataka izračuna se stvarni otpor uzemljivača R_{vz} u koji je unesen i djelatni otpor:



Sl. 19.1–1. Faktori f_r i f_u za proračun otpora uzemljivača velike duljine u ovisnosti o κl.

$$R_{vz} = \frac{\kappa}{g} f_r \tag{19.1–3}$$

Faktor f_r prema Kochu [24] je:

$$f_r = \operatorname{ctg} \operatorname{hyp}(\kappa l) = \frac{e^{\kappa l} + e^{-\kappa l}}{e^{\kappa l} - e^{-\kappa l}} \tag{19.1–4}$$

i prema formuli (19.1–3) pokazuje kako stvarni otpor uzemljenja opada po duljini uzemljivača. Taj faktor može se očitati i sa slike 19.1–1.

Faktor f_u kojim se definira opadanje napona po duljini uzemljivača je:

$$f_u = \frac{1}{2}\left(e^{\kappa l} - e^{-\kappa l}\right) \tag{19.1–5}$$

a može se očitati i sa slike 19.1–1.

Omjer između napona na početku i na kraju uzemljivača izračunavamo s pomoću formule:

$$\frac{U_z}{U_l} = \frac{1}{f_u} = \frac{1}{\frac{1}{2}\left(e^{\kappa l} - e^{-\kappa l}\right)} \tag{19.1–6}$$

gdje je:

U_z napon na početku uzemljivača duljine l

U_l napon na kraju uzemljivača.

19.2. OBRUČNI UZEMLJIVAČ KAO POVRŠINSKI UZEMLJIVAČ ($h = 0$)

Kružni obruč rijetko se susreće u praksi. Proračun za takav slučaj ipak vrijedi za druge oblike obruča ako duljina obuhvaćenog uzemljivača ne prelazi njegovu dvostruku širinu.

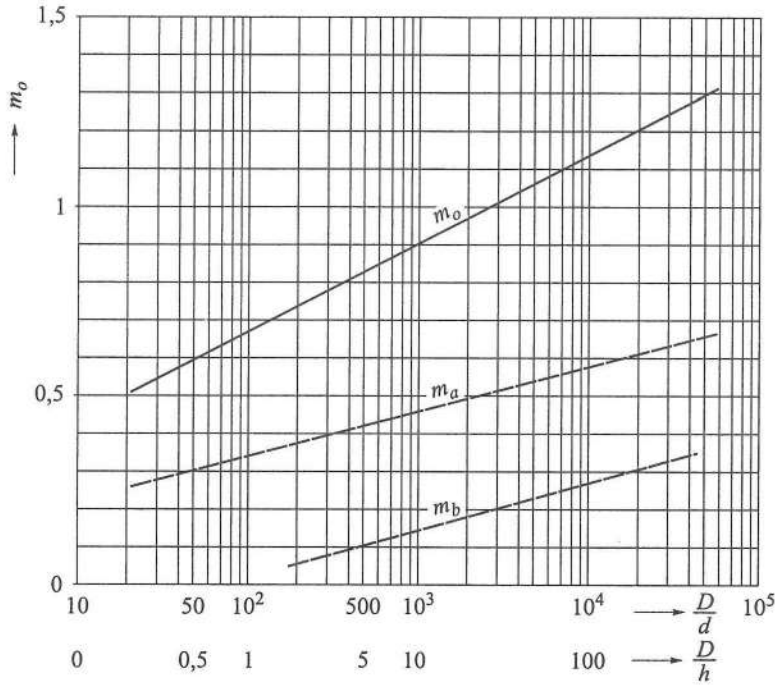
a) Otpor uzemljenja za površinski obručasti uzemljivač, $h = 0$:

Uzemljivači se ne polažu na površinu zemlje. Međutim, u slučaju površinskih uzemljivača velikih površina, kakvi su u uporabi na većim postrojenjima, otpori se uzemljenja i za uzemljivače na dubini od 1 m ne razlikuju mnogo od onih koje bi imali uzemljivači položeni na površinu zemlje, te je otpor uzemljenja:

$$R_{oz} = m_o \frac{\rho_z}{D} \tag{19.2–1}$$

b) Otpor uzemljenja za dubinski obručni uzemljivač, $h > 0$:

$$R_{ozh} = m_1 \frac{\rho_z}{D}, \quad m_1 = m_a + m_b, \quad m_a = f\left(\frac{D}{d}\right), \quad m_b = f\left(\frac{D}{h}\right) \tag{19.2–2}$$



Sl. 19.2–1. Faktori korekcije obručnog uzemljivača, m_o, m_a, m_b: $m_o = f(D/d)$ i $m_a = f(D/d)$, te $m_b = f(D/h)$.

gdje je:

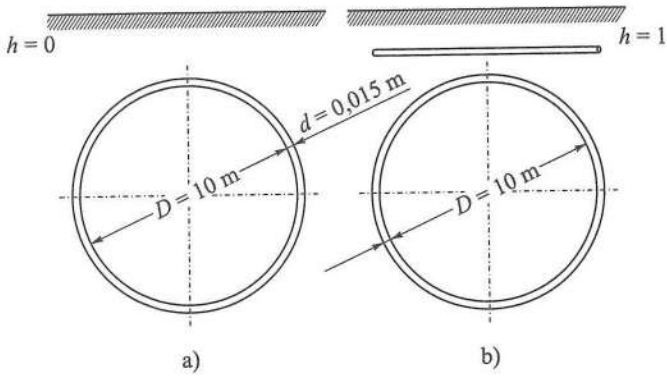
R_{oz} otpor uzemljenja površinskoga obručnog uzemljivača, Ω
m_o faktor korekcije, očitava se sa slike 19.2–1 za površinski uzemljivač, ($h = 0$)
m_a faktor korekcije, očitava sa slike 19.2–1 za dubinski uzemljivač, ($h > 0$)
m_b faktor korekcije uzemljivača, očitava se sa slike 19.2–1
D promjer obruča, m
h dubina ukopa, m
d računski promjer vodiča uzemljivača, m.

Proračun otpora uzemljenja obručastog uzemljivača po formuli (19.2–1) zadovoljava do promjera obruča $D \leq 10$ m ili točnije do omjera promjera obruča D i promjera vodiča obručastog uzemljivača d, $D/d \leq 800$. Za veći promjer obručastog uzemljivača ($D > 10$ m) otpor uzemljenja praktično je jednak otporu trakastog uzemljivača duljine πD.

Primjer 19A

Izračunajte otpor uzemljenja za obručni uzemljivač prikazan na slici 19.2–2. Računajte kao trakasti i kao obručasti uzemljivač .

Obručni uzemljivač na površini zemlje ($h = 0$) izveden je od trake 30 mm × 3,5 mm s računskim promjerom $d = 0{,}015$ m i promjerom obruča $D = 10$ m u zemljištu $\rho_z = 100$ Ωm, kako je to prikazano na sl. 19.2–2.



Sl. 19.2–2. Kružni obruč kao uzemljivač (obručni uzemljivač): a) na površini zemlje ($h = 0$) i b) na dubini $h = 1$ m.

Omjer $D/d = 667$, sa slike 19.2–1 dobiva se $m_o = 0{,}87$ i prema (19.2–1) je:

$$R_{oz} = m_o \frac{\rho_z}{D} = 0{,}87 \frac{100}{10} = 8{,}7\ \Omega$$

Ako bismo isti uzemljivač položili rastegnuto, kao pravocrtni, dobili bismo prema proračunu za pravocrtni uzemljivač:

$$l = \pi D = 3{,}14 \cdot 10 = 31{,}4 \text{ m}$$

i faktor $K_t = 2{,}65$, pa se primjenom formule dobiva:

$$R_z = K_t \frac{\rho_z}{l} = 2{,}65 \frac{100}{31{,}4} = 8{,}44\ \Omega$$

Prema tome, razlika iznosi samo 3 %, a kod većih promjera D ona je još manja.

Kod obručastih uzemljivača s promjerom većim od $D = 10$ m ili točnije za omjer D/d veći od 800, otpor uzemljenja obručnog uzemljivača približno je jednak otporu pravocrtnog uzemljivača jednake duljine.

19.3. OBRUČNI UZEMLJIVAČ UKOPAN U DUBINU h

Za proračun otpora uzemljenja na slici 19.2–1 nacrtane su krivulje faktora m_a i m_b. Faktor m_a ovisi od vanjskog promjera obručnog uzemljivača D i promjera uzemljivača d, $m_a = D/d$ a faktor m_b od vanjskog promjera uzemljivača D i dubine ukopa h, $m_b = D/h$.

Zajednički faktor m_1 jeste zbroj ova dva faktora $m_1 = m_a + m_b$.

Otpor uzemljanja obručnog uzemljivača računamo po formuli:

$$R_{ozh} = m_1 \frac{\rho_z}{D} \tag{19.3–1}$$

kako je to navedeno u formuli (19.2–2).

Primjer 19B

Za obručni dubinski uzemljivač položen na dubinu $h = 1$m iz primjera 19A potrebno je izračunati otpor uzemljenja. Podaci: $h = 1$ m, $D/d = 667$, $D/h = 10$, $D = 10$ m, $d = 0{,}015$ m.

Iz dijagrama (v. sl. 19.2–1) očitavaju se faktori:

m_a u ovisnosti od $D/d = 667$, $m_a = 0{,}444$
m_b u ovisnosti od $D/h = 10$, $m_b = 0{,}15$,

te je zajednički faktor m_1 i otpor uzemljenja obručnog uzemljivača R_{ozh}:

$$m_1 = m_a + m_b = 0{,}444 + 0{,}15 = 0{,}594$$

$$R_{ozh} = m_1 \frac{\rho_z}{D} = 0{,}594 \cdot \frac{100}{10} = 5{,}94\ \Omega$$

Otpor uzemljenja obručnog uzemljivača, izračunan kao trakasti uzemljivač iznosi:

$$l = \pi D = \pi \cdot 10 = 31{,}4\,\mathrm{m}$$

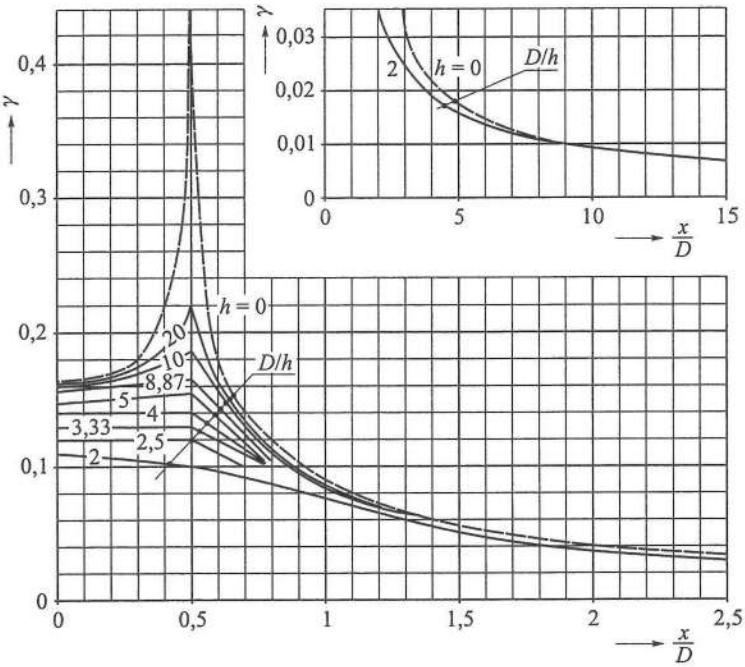
$$R_z = K_t \frac{\rho_z}{l} = 1{,}76 \cdot \frac{100}{31{,}4} = 5{,}6\ \Omega$$

te je razlika otpora uzemljenja izračunatog kao trakasti i kao obručni uzemljivač:

$$5{,}94 - 5{,}6 = 0{,}34\ \Omega$$

ili 5,72 %.

Primjedba: Kružne obruče velikog promjera pri omjeru $D/h > 100$ računamo kao da su na površini zemlje ($h = 0$).



Sl. 19.3–1. Faktor γ za određeni omjer D/h u ovisnosti o relativnoj udaljenosti x/D obručnog uzemljivača za područje x/D od 0 do 2,5 i područje x/D od 0 do 15. Krivulja $h = 0$ vrijedi za obručni uzemljivač na površini zemlje.

Naponski lijevak očitava se iz krivulje na slici 19.3–1 po sljedećem postupku:

a) Obručasti uzemljivač na površini zemlje $h = 0$

Sa slike 19.3–1 očita se faktor γ za x/D i $h = 0$ i faktor m_o sa slike 19.2–1 za D/d te izračunamo relativni napon tla u_r po formuli:

$$u_r = \frac{\gamma}{m_o} \tag{19.3–1}$$

Poznavajući napon uzemljivača U_z ($U_z = I_z \cdot R_z$) i relativni napon tla u_r moguće je izračunati apsolutni napon tla na površini iznad uzemljivača po formuli:

$$U = u_r \cdot U_z \tag{19.3–2}$$

gdje je:

γ faktor za proračun naponskog lijevka obručnog uzemljivača
u_r relativni napon tla
U_z napon uzemljivača.

b) Za obručni uzemljivač na dubini h

Izračuna se omjer D/h i potraži se na slici 19.3–1 krivulja za taj omjer. Iz te krivulje dobiva se faktor γ za x/D, a sa slike 19.2–1 dobiva se faktor m_1 za D/d i izračuna se relativni napon prema formuli:

$$u_r = \frac{\gamma}{m_a} \tag{19.3–3}$$

Slijedi apsolutni napon tla (19.3–2):

$$U = u_r \cdot U_z$$

Tablica 19.3–1. Broj krivulje za omjer D/h obručnog uzemljivača za izračun faktora γ sa slike 19.3–1.

Broj krivulje	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2	$h = 0$
D/h	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2	D/h^*

D/h^* obručni uzemljivač na površini zemlje, $h = 0$. Krivulja $h = 0$ odgovara za svaki omjer D/h obručnog uzemljivača na površini zemlje

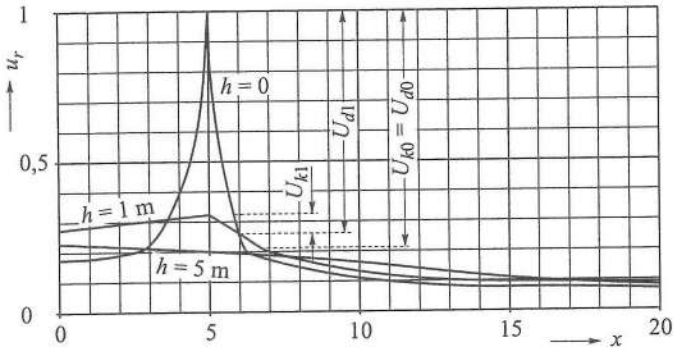
x okomita udaljenost od uzemljivača, m

Primjer 19C

Za uzemljivač iz primjera 19A i 19B treba izračunati relativni napon u_r za različite udaljenosti x od obručnog uzemljivača promjera $D = 10$ m na površini zemlje ($h = 0$) i na dubinama $h = 1$ m i $h = 5$ m.

Primjenom formula (19.3–1), (19.3–2) i dijagrama na slikama 19.1–1 i 19.3–3, izračunane i očitane vrijednosti relativnog napona tla dane su u tablici 19.3–2. Relativni naponi za $h = 0$ m, $h = 1$ m i $h = 5$ m u ovisnosti o udaljenosti x prikazane su na slici 19.3–2.

Na slici 19.3–2. najveći relativni napon koraka možemo odrediti kao razliku vrijednosti pri $x = 5$ m i $x = 6$ m. Na kraju, iz relativnog napona koraka i poznatog napona uzemljivača može se izračunati i napon koraka (dan u tablici 19.3–3), uzimajući npr. da je napon uzemljivača $U_z = 125$ V.



Sl. 19.3–2. Relativni napon naponskog lijevka obručnog uzemljivača promjera $D = 10$ m za $h = 0$ m, $h = 1$ m i $h = 5$ m.

Tablica 19.3–2. Relativni napon tla obručnog uzemljivača za različite dubine ukopa: $h = 0$ m, $h = 1$ m, $h = 5$ m.

	Udaljenost točke x	0	2	5	6	10	15	20
	x/D	0	0,2	0,5	0,6	1,9	1,5	2
$h = 0$ m	γ, (v. sl. 19.3–1)	0,162	1,680	–	0,176	0,080	0,058	0,039
	Relativni napon tla u_r $m_o = 0{,}87$, (v. sl. 19.2–1)	0,186	0,193	1	0,202	0,099	0,067	0,045
$h = 1$ m	$D/h = 10/1 = 10$ γ, (v. sl. 19.3–1)	0,158	0,162	0,186	0,154	0,082	0,056	0,037
	Relativni napon tla u_r $m_1 = 0{,}594$ $m_o = 0{,}150$ $m_a = 0{,}444$	0,266	0,273	0,313	0,259	0,138	0,094	0,062
$h = 5$ m	$D/h = 10/5 = 2$ γ, (v. sl. 19.3–1)	0,108	0,106	0,100	0,096	0,074	0,052	0,036
	Relativni napon tla u_r $m_1 = 0{,}509$ $m_a = 0{,}444$ $m_o = 0{,}065$	0,212	0,208	0,197	0,189	0,145	0,102	0,071

Tablica 19.3–3. Relativni napon koraka u_k obručnog uzemljivača promjera $D = 10$ m za $h = 0$ m, $h = 1$ m i $h = 5$ m.

Dubina ukopa h	$h = 0$	$h = 1$ m	$h = 5$ m
$u_k = u_{r5} - u_{r6}$	$1{,}000 - 0{,}202 = 0{,}798$	$0{,}312 - 0{,}259 = 0{,}053$	$0{,}197 - 0{,}189 = 0{,}008$
$U_k = u_k \cdot 125$ V	$0{,}798 \cdot 125 = 99{,}70$ V	$0{,}053 \cdot 125 = 6{,}62$ V	$0{,}008 \cdot 125 = 1{,}00$ V

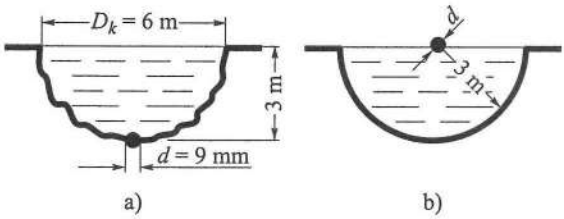
19.4. UZEMLJIVAČI U RIJEČNOM KORITU

U slučaju hidroelektrana na kamenitom tlu, uzemljenje se može vrlo uspješno riješiti povezivanjem armature betonskih brana i pregrada s uređajem za uzemljenje. Pri tome, svi dijelovi armature moraju biti međusobno galvanski spojeni (najbolje zavareni) i imati pristupačne krajeve za priključenje uređaja koje treba uzemljiti. Međutim, umjesto na kamenito tlo trake uzemljivača mogu se postaviti i na dno dotočnih i otočnih korita. Takvim se mjerama postiže, uz mnogo manje investicije, mnogo manji otpori uzemljenja nego u slučaju polaganja uzemljivača u kamenito tlo (otpornost vode je oko 50 Ωm). Otpor uzemljenja trakastog uzemljivača položenog na dno riječnog korita (v. sl. 19.4–1) računa se s pomoću formule:

$$R_{kz} = \frac{\rho_v}{\pi l} \ln \frac{D_k}{d} \qquad (19.4\text{–}1)$$

gdje je:

D_k širina korita približno polukružnog presjeka u kojem je položen uzemljivač, m
d računski promjer vodiča uzemljivača, m
R_{kz} otpor uzemljenja, Ω
ρ_v otpornost vode, Ωm
l duljina vodiča uzemljivača, m.



a) stvarni presjek riječnog korita
b) računski presjek riječnog korita
D_k širina riječnog korita
d računski promjer vodiča trakastog uzemljivača

Sl. 19.4–1. Uzemljivač u riječnom koritu.

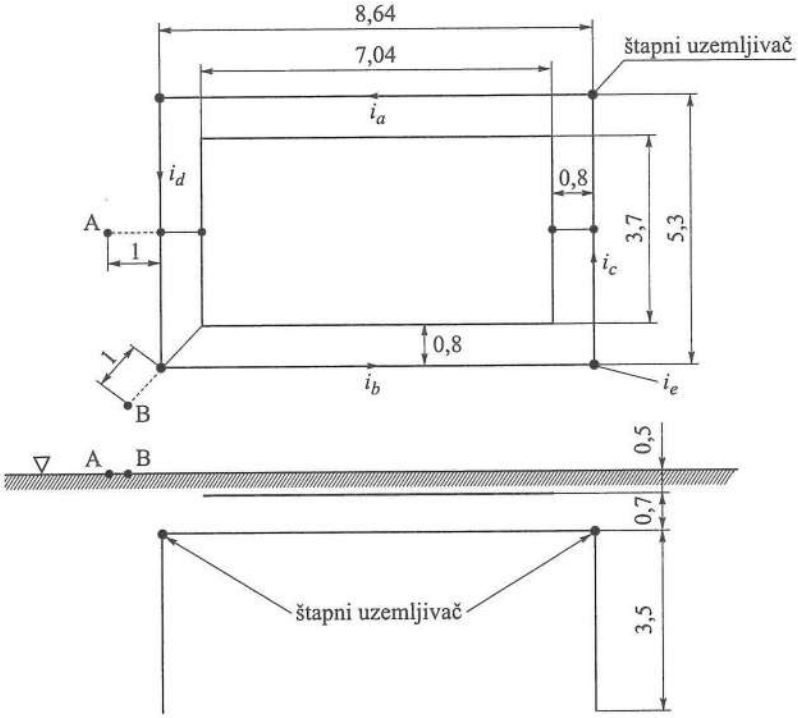
Primjer 19D

Treba izračunati otpor uzemljenja uzemljivača duljine l = 500 m u riječnom koritu širine D_k = 6 m i dubine 3 m. U korito je položeno bakreno uže presjeka 50 mm^2 koje ima računski promjer d = 0,009 m. Ako je otpornost vode ρ_v = 50 Ωm, otpor uzemljenja (19.4–1) iznosi:

$$R_{kz} = \frac{\rho_v}{\pi l} \ln \frac{D_k}{d} = \frac{50}{\pi \cdot 500} \ln \frac{6}{0,009} = 0,21\,\Omega$$

19.5. KARAKTERISTIKE TIPSKIH UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 kV U KOMBINACIJI TRAKASTIH I ŠTAPNIH UZEMLJIVAČA

Uzemljivač s dvije pravokutne konture na dvije razine, sondama (štapnim uzemljivačima) u kutovima i trakastim uzemljivačima prikazan je na slici 19.5–1, tzv. konfiguracija I. Vodoravni su elementi uzemljivača trake Fe/Zn (50 × 4) mm, a uspravni, cijevi ϕ 70 mm, duljine 3,5 m. Utjecaj se trake za spajanje kontura zanemaruje. Proračun je obavljen primjenom opće metode [L1].



Sl. 19.5–1. Skica karakterističnog uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih i štapnih uzemljivača s dva pravokutna uzemljivača (na različitim dubinama od 0,5 i 1,2 m) i s četiri štapna uzemljivača na kutovima većeg pravokutnika, označen kao konfiguracija I.

Izračuna se otpor uzemljenja uzemljivača u ovisnosti o otpornosti tla, napon uzemljivača U_z. Napon dodira za stajne točke A i B koje su na udaljenosti od 1 m u ovisnosti o umnošku struje kvara I_z i ρ_z, te struje odvoda po jedinici duljine pojedinih elemenata u postocima struje kvara, tablica 19.5–1, za sljedeće konfiguracije: konfiguracija I, uzemljivač s dvije pravokutne konture i četiri štapna uzemljivača na kutovima većeg pravokutnika, konfiguracija II isti je uzemljivač, ali s izostavljenom

unutarnjom konturom, konfiguracija III isti je uzemljivač samo s vanjskom konturom bez uspravnih uzemljivača.

Primjer 19E

Primjer proračuna uzemljivača s dva prstenasta pravokutna uzemljivača i četiri štapna uzemljivača na kutovima većeg pravokutnika u kombinacijama konfiguracija I, II i III.

Rezultati proračuna dani su u tablici 19.5–1 gdje su U_{dA} i U_{dB} naponi dodira za karakteristične stajne točke A i B. Iz konfiguracije uzemljivača procjenjuje se da su od svih stajnih točaka s kojih se mogu dohvatiti uzemljeni dijelovi točke A i B na najnižem potencijalu.

Tablica 19.5–1. Rezultati izračuna otpora uzemljenja uzemljivača kao funkcije specifičnih otpora tla $R_z = kf(\rho_z)$, napona uzemljivača $U_z = kf(\rho_z I_z)$, napona dodira u točkama A i B kao funkcije $U_d = k_1 f(\rho_z I_z)$ i postoci struje u granama a, b, c i d.

	Vrsta uzemljivača		
	konfiguracija I	konfiguracija II	konfiguracija III
R_z, Ω	$0{,}04576\,\rho_z$	$0{,}04828\,\rho_z$	$0{,}0560\,\rho_z$
U_z, V	$0{,}04578\,\rho_z I_z$	$0{,}04828\,\rho_z I_z$	$0{,}0560\,\rho_z I_z$
U_{dA}, V	$0{,}01622\,\rho_z I_z$	$0{,}0170\,\rho_z I_z$	$0{,}01644\,\rho_z I_z$
U_{dB}, V	$0{,}0117\,\rho_z I_z$	$0{,}01854\,\rho_z I_z$	$0{,}0250\,\rho_z I_z$
i_a, %	0,986	–	1,490
i_b, %	0,948	–	1,518
i_c, %	1,438	1,016	2,366
i_d, %	1,396	1,90	2,492
i_e, %	2,814	3,194	–

Uzemljivač konfiguracije II ima veći otpor uzemljenja za 5 % od konfiguracije I. Kod uzemljivača III to povećanje iznosi 22 %. U_{dA} uzemljivača III je za 1 %, a uzemljivača II za 5 % veća nego kod konfiguracije I. Konfiguracije II i III, posebno ova posljednja, znatno su nepovoljnije od I sa stajališta dodirnog napona na kutovima uzemljivača U_{dB}. Kod uzemljivača konfiguracije II napon je veći za 58 %, a kod konfiguracije III kod koje izostaje pozitivan efekat štapnih uzemljivača za 11,4 %.

U odvođenju struje najintenzivnije sudjeluju štapni uzemljivači i, u nešto manjoj mjeri, trake vanjske vodoravne konture. Unutarnja kontura doprinosi ublažavanju potencijalnih razlika na površini tla iznad i na rubovima uzemljivača.

Proračuni dopuštaju da se zaključi da uzemljivač konfiguracije II treba s obzirom na otpor uzemljenja smatrati ekvivalentnim potpunoj konfiguraciji I.

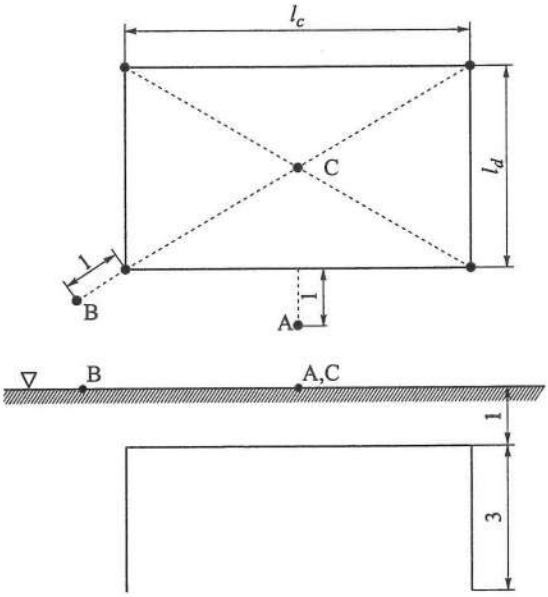
Struje u pojedinim granama pravokutnog uzemljivača i_a, i_b, i_c i i_d označene su na slici 19.5–1, dok je struja kroz štapni uzemljivač i_e.

Primjer 19F

Na računalu su analizirane karakteristike uzemljivača konfiguracije II s različitim duljinama strana vodoravne konture l_c i l_d. Usvojeno je da su vodoravni elementi trake Fe/Zn 1 × (30 × 4) mm, uspravni, cijevi duljine 3 m, ϕ 70 mm.

Izačunane su opće geometrijske karakteristike uzemljivača i dodirni naponi u točkama A, B i C (v. sliku 19.5–2).

Točke A i B na udaljenosti su od 1 m od pravokutnog uzemljivača, a štapni su uzemljivači u kutovima pravokutnog uzemljivača, kako je to označeno na slikama 19.5–1 i 19.5–2.



Sl. 19.5–2. Pravokutni uzemljivač od željezno pocinčane trake 30 mm × 4 mm i sa štapnim uzemljivačima ϕ 70 mm duljine 3 m postavljenim na kutovima pravokutnog uzemljivača, označen kao konfiguracija II.

Relativni otpor uzemljenja:

$$r_z = \frac{R_z}{\rho_z}, \tag{19.5–1}$$

koji je jednak relativnom naponu uzemljivača u_r:

$$u_r = \frac{U_z}{\rho_z I_z} = \frac{R_z I_z}{\rho_z I_z} \tag{19.5–2}$$

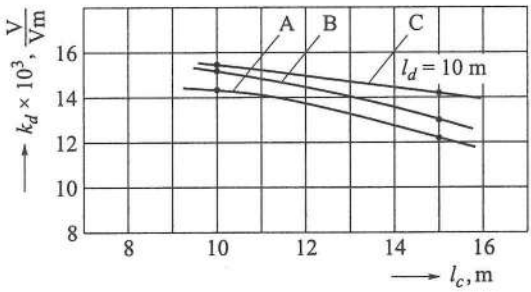
I relativni dodirni napon k_d za karakteristične stajne točke A, B i C (v. sl. 19.5–2), prikazan na slici 19.5–3, izračunava se po formuli:

$$k_d = \frac{U}{\rho_z I_z} \tag{19.5–3}$$

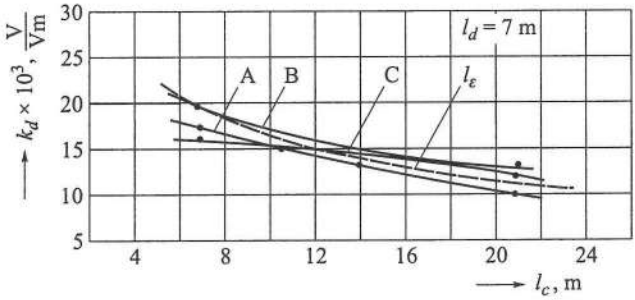
a relativni najveći dodirni napon u točkama A, B i C po formuli:

$$k_{dM} = \frac{U_{dM}}{\rho_z I_z} \tag{19.5–4}$$

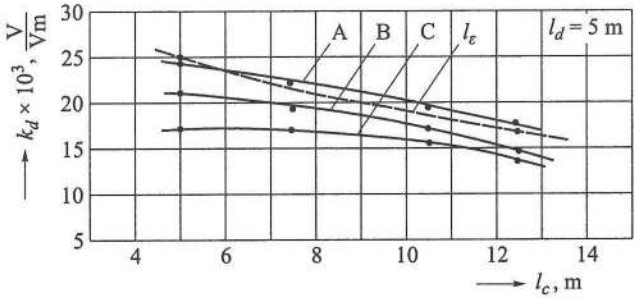
Naponi koraka znatno su manji od dodirnog napona. Oni nisu posebno izračunani.



Sl. 19.5–3. Relativni najveći dodirni napon k_{dM} za karakteristične točke: A, B i C i $k_d = f(l)$ za l_d =10 m.



Sl. 19.5–4. Relativni najveći dodirni napon k_{dM} za karakteristične točke: A, B i C i $k_d = f(l)$ za l_d = 7 m.



Sl. 19.5–5. Relativni najveći dodirni napon k_{dM} za karakteristične točke: A, B i C i $k_d = f(l)$ za l_d = 5 m.

Rezultati proračuna relativnoga dodirnog napona $k_d = f(l)$ prikazani su na slici 19.5–3, a na slici 19.5–4 i 19.5–5 relativni dodirni napon za karakteristične točke uzemljivača s različitim l_c i za l_d = 7 i 5 m i za $k_d = f(l_c)$.

Relativni naponi koraka izračunani su prema praktičnoj Lauretovoj formuli [L2].

$$k_d \approx 0{,}8 \cdot \rho_z \cdot \frac{I_z}{l_\varepsilon} \cdot \frac{1}{\rho_z I_z} = \frac{0{,}8}{l_\varepsilon} \qquad (19.5\text{–}5)$$

Relativni otpor uzemljenja:

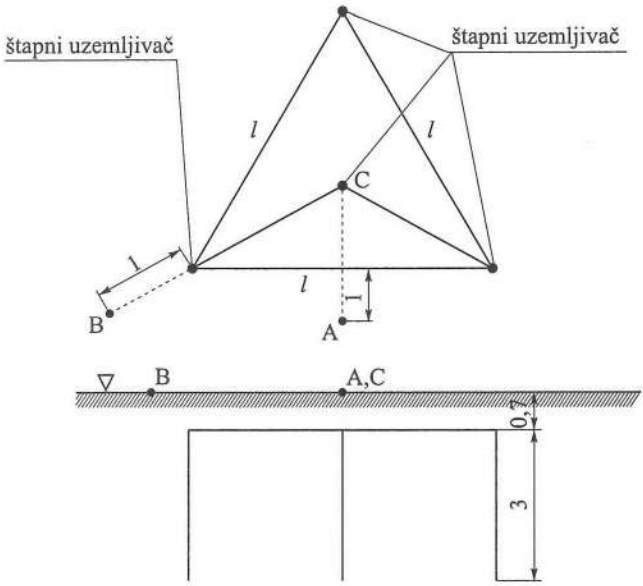
$$r_z = \frac{R_z}{\rho_z} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{2\pi l_s} \ln\left(\frac{4l_s}{d}\right), \quad \frac{1}{\mathrm{m}} \qquad (19.5\text{–}6)$$

gdje je:

- n broj štapnih uzemljivača
- l_s duljina štapnog uzemljivača, m
- d promjer (vanjski) štapnog uzemljivača, m
- l_ε ukupna duljina svih elemenata uzemljivača (trakastih i štapnih)
- l_c i l_d duljine strana pravokutnog uzemljivača, slika 19.5–2.

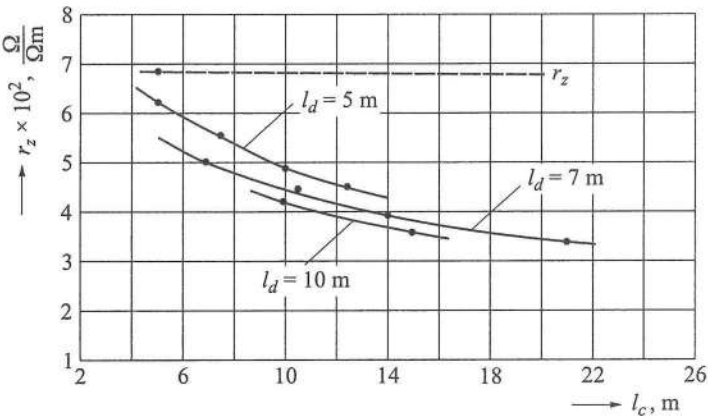
Primjer 19G

Na slici 19.5–6 prikazan je karakteristični uzemljivač s kracima l i štapnim uzemljivačima na kutovima i u točki C.

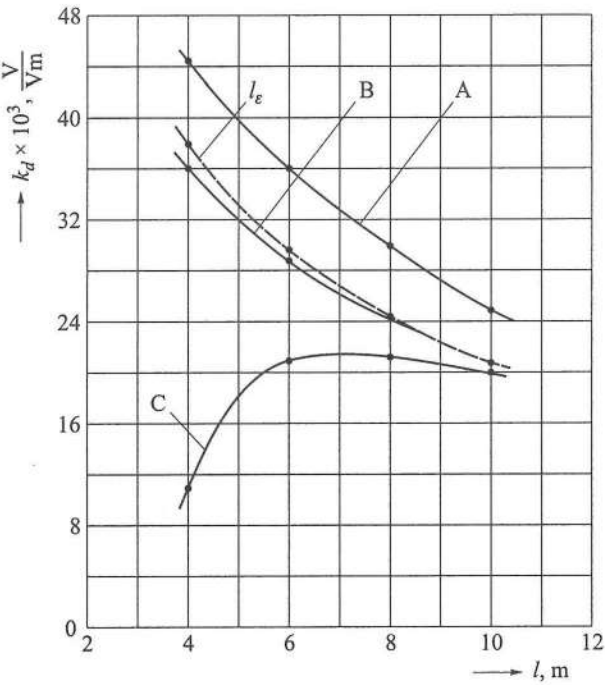


Sl. 19.5–6. Karakteristični pogonski uzemljivač TS 10(20)/0,4 kV u obliku trokuta sa stranicama duljine l i štapnim uzemljivačima u kutovima i točki C, duljine 3 m.

Na slici 19.5–8 izračunane su vrijednosti relativnog dodirnog napona k_d za karakteristični uzemljivač sa slike 19.5–6. Isprekidana krivulja prikazuje izračun relativnog dodirnog napona k_d po Lauretovoj formuli (19.5–4).



Sl. 19.5–7. Relativni otpor uzemljenja r_z u ovisnosti o duljini stranice pravokutnog uzemljivača l_c za određene duljine pravokutnog uzemljivača l_d sa slike 19.5–2.



Sl. 19.5–8. Relativni dodirni napon k_d u ovisnosti o duljini trakastih uzemljivača stranice trokuta l i duljine štapnog uzemljivača od 3 m za uzemljivač sa slike 19.5–6.

Budući da kod pogonskih uzemljivača ne postoji mogućnost dodira uzemljenih dijelova, izračunane vrijednosti k_d sa slike 19.5–7 ako se promatrani uzemljivač upotrijebi kao pogonski, mogu poslužiti kao sigurna procjena potencijalne razlike koraka.

Sažetak

Prikazani rezultati proračuna općih karakteristika uzemljivača omogućavaju jednostavnu procjenu pogodnosti primjene određene konfiguracije uzemljivača u konkretnim uvjetima postrojenja u pogledu struje odvođenja i srednje otpornosti tla sa stajališta otpora rasprostiranja, napona uzemljivača i raspodjele potencijala. Priloženi dijagrami mogu poslužiti kao orijentacija pri izboru uzemljivača i procjeni potrebe za korekcijom osnovne konfiguracije radi oblikovanja potencijala.

Svi računalni proračuni programirani su prema algoritmu u [L1].

Literatura

[L1] Nahman, I., M.: *Metoda proračuna složenih uzemljivača na digitalnom računalu i opće karakteristike uzemljivača*, Nac. CIGRE, Ohrid, 1972., R 23.09.

19.6. OTPORNIK ZA UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA ELEKTROENERGETSKIH MREŽA

19.6.1. Uvod

Uzemljenje zvjezdišta elektroenergetske mreže preko otpornika za ograničenje struje zemljospoja (jednopolnog kvara) na određeni iznos ima veliku ulogu pri smanjenju ili potpunom eliminiranju generiranja sklopnih prenapona, čime se znatno povećava pouzdanost i raspoloživost elektroenergetskog sustava.

Uzemljenje zvjezdišta preko otpornika uglavnom se upotrebljava u srednjonaponskim mrežama od 10 A i 20 kV i rjeđe u 35 kV mreži i izvodi se kad kapacitivna struja u izoliranoj mreži prijeđe granične vrijednosti [L2]: za mrežu 10 kV, $I_c = 20$ A; za mrežu 20 kV, $I_c = 15$ A i za mrežu 35 kV, $I_c = 10$ A.

Otpornik za uzemljenje dimenzionira se na ograničenje struje zemljospoja najčešće na 300 A, nešto rjeđe na 150 A i puno rjeđe na 1000 A.

Dakako da prije prelaska na uzemljeno zvjezdište preko otpora s ograničenjem struje zemljospoja (recimo na 300 A) treba analizirati druge mjere za smanjenje kapacitivne struje galvanski vezane mreže (kao što su to sankcioniranje mreže, tj. smanjenje ukupne duljine galvanski spojene mreže na jednim sabirnicama, a posebno zbog mnogo veće kapacitivne struje kabelske mreže). Osim toga, treba analizirati sve probleme koje će stvarati struja zemljospoja od 300 A kao što su to stvaranje opas-

noga dodirnog napona i napona koraka na uzemljivačima i utjecaj na susjedne PTT vodove.

Prema [76] u Hrvatskoj je 1988. godine bilo u pogonu 148 transformatorskih stanica u transformaciji X/10(20) kV u pogonu s izoliranim zvjezdištem i kapacitivnom strujom većom od 20 A, što je problematično za generiranje sklopnih prenapona i povećanje kvarova i zastoja te time i smanjenje pouzdanosti i raspoloživosti sustava.

19.6.2. Prednost metalnih otpornika za uzemljenje neutralne točke elektroenergetske mreže u odnosu na elektrolitske

Za uzemljenje neutralne točke srednjonaponskih mreža upotrebljavaju se pretežno metalni otpornici, osim Japana gdje se upotrebljavaju elektrolitski (tekući) otpornici [76].

Metalni otpornik u usporedbi s elektrolitskim ima sljedeće prednosti:

- vrijednost je otpora konstantna tijekom rada
- vremenska je konstanta ugrijavanja T kraća što omogućuje izbor otpornika s kraćim nazivnim trajanjem opterećenja
- jednostavna je ugradnja strujnih transformatora za priključak zaštitnih uređaja
- lakša je montaža na mjestu ugradnje i neznatno je održavanje tijekom rada
- ne treba ugraditi dodatne grijače za sprečavanje zamrzavanja elektrolita jer se tijekom rada dovoljno zagrijava.

19.6.3. Karakteristike metalnih otpornika za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetske mreže

Otpornik za uzemljenje mreže neutralne točke elektroenergetske mreže mora zadovoljiti sljedeće pogonske uvjete:

a) Pogon bez struje kvara. Zvjezdište je na potencijalu zemlje i kroz otpornik teče trajna struja izjednačenja od nekoliko ampera zbog moguće nesimetrije opterećenja faza.

b) Pogon s malim strujama kvara, nekoliko desetina ampera i kratkim vremenom (obično $t_n \leq 10$ s) koju otpornik mora izdržati u vremenu prije nego što proradi zaštita, obično je to vrijeme $t_n = 10$ s.

c) Pogon s velikim strujama u svim slučajevima jednopolnog zemljospoja kroz otpornik teče najveća limitirana struja u vremenu prije nego što proradi zaštita. Obično je to u vremenu oko 0,5 s.

d) Nazivni napon otpornika U_{no} bira se suglasno s nazivnim naponom mreže U_n:

$$U_{no} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \tag{19.6–1}$$

e) Nazivna vrijednost otpora otpornika određena je omjerom nazivnog napona U_{no} i nazivne struje kroz otpornik I_{no} prema izrazu:

$$R_n = \frac{U_{no}}{I_{no}} \tag{19.6–2}$$

Otpor R_n prema izrazu (19.6–2) ima vrijednost pri referentnoj temperaturi okoline.

Tako prema [76] francuskoj normi NFC 63 – 200 definira referentnu temperaturu od 20 °C, a američka norma ANSI – IEEE 32 – 1972. definira referentnu temperaturu od 25 °C.

U skladu s [L3] vrijednost otpora otpornika za uzemljenje mjerena istosmjernom strujom na temperaturi od +20 °C mora biti između 0,95 × R_n i 1,05 × R_n, dok za otpornike podvrgnute tipskim ispitivanjima gornju granicu treba smanjiti na R_n.

Stvarne vrijednosti otpora pri nastanku kvara razlikuju se od R_n zbog zagrijavanja otpornika.

Struja I_{no} nema značenje kakvo imaju vrijednosti nazivnih struja za sklopne uređaje i ostale elemente postrojenja jer se ne dopušta da trajno teče. Da bi se točno odredili uvjeti rada otpornika s aspekta zagrijavanja i odredila moguća odstupanja otpora od nazivne vrijednosti, proizvođač otpornika utvrđuje dopušteno trajanje struje I_{no}, odnosno dopušteni ciklus opterećivanja: struja – vrijeme. Pritom je potrebno dati i podatke o graničnim vrijednostima otpora jer je to vrlo važno za namještanje zemljospojne zaštite i dimenzioniranje uzemljenja objekata u elektroenergetskoj mreži koja se uzemljuje s pomoću otpornika, glede stvaranja opasnog dodirnog napona i napona koraka.

Otpornik treba tako dimenzionirati da se previše ne zagrije kako ne bi došlo do prevelike promjene otpora, a zbog toga i do ograničenja struje zemljospoja na 300 A ili 150 A, kako se to danas primjenjuje.

Zbog brzog porasta temperature tijekom jednopolnog kvara može se računati s time da je proces adijabatski, pa stoga vrijedi:

$$\int_0^t i_z^2 \cdot \mathrm{d}t = \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} \frac{m \cdot C_v}{R_v} \mathrm{d}\vartheta \tag{19.6–3}$$

gdje je:

i_z	trenutna vrijednost struje jednopolnog kvara, A
t	vrijeme trajanja kvara, s
m	masa otpornika, kg
C_v	specifična toplina otpornika na temperaturi ϑ
R_v	djelatni otpor otpornika Ω, na temperaturi ϑ
ϑ_0	početna temperatura otpornika
ϑ	temperatura otpornika u trenutku t, konačni trenutak u vremenskom intervalu proticanja struje zemljospoja kroz otpor za uzemljenje i ograničenje struje zemljospoja
$\int_0^t i_z^2 \cdot \mathrm{d}t$	toplinski impuls struje i_z.

Dopuštena vrijednost toplinskog impulsa struje kvara određuje se iz jednadžbe (19.6–3) uvrštavanjem $\vartheta = \vartheta_g$, pri čemu je ϑ_g granična dopuštena temperatura otpornika.

U slučaju metalnih otpornika promjena otpora s temperaturom iznosi:

$$R = R_{20} \cdot [1 + \alpha(\nu - 20)] \tag{19.6–4}$$

Ako se toplinski impuls prikaže preko efektivne vrijednosti struja kvara, a specifična toplina c_n i otpor R_n zamijene svojim srednjim vrijednostima c_s i R_s u temperaturnom opsegu od ϑ_0 do ϑ_g, dolazi se do izraza:

$$I_z^2 \cdot t < \frac{m \cdot c_s}{R_s} \cdot (\vartheta_g - \vartheta_0) \tag{19.6–5}$$

Radi zaštite od utjecaja vlage otpornici se izrađuju od nehrđajućeg čelika i od slitina.

Osnovne karakteristike materijala koji se najčešće upotrebljavaju za izradu otpornih elemenata dane su u tablici 19.6–1.

Tablica 19.6–1. Osnovne karakteristike materijala koji se najčešće upotrebljavaju za izradu otpornih elemenata.

Karakteristika	Oblik otpornih elemenata		
	Žičani elementi	Elementi od lijevanog željeza	Elementi od nehrđajućeg čelika
Materijal	CuNi44 (constantan) NiCr8020	Površinski obrađeno lijevano željezo	Nehrđajući čelik nekorodirajuća slitina CrNi
Otpor pojedinog elementa pri 20 °C	1500...0,5 Ω	0,2...0,01 Ω	0,75...0,04 Ω
Dopušteno trajno strujno opterećenje elemenata	0,5...20 A	25...125 A	25...250 A
Vremenska konstanta zagrijavanja T_v	20...90 s	240...600 s	120 s
Povećanje otpora s porastom temperature	0,4 %/100 K	7,5 %/100 K	5 %/100 K
Stupanj izolacije			
– prema kućištu	600 V/1 kV	1 kV	1 kV
– prema zemlji preko izolatora	3,6/52 kV	3,6/52 kV	3,6/52 kV

Iz tablice 19.6–1 očito je da se žičani elementi upotrebljavaju ekonomično do dopuštene trajne strujne opteretivosti od 15 A. Za struje iznad 25 A upotrebljavaju se elementi od lijevanog željeza, nehrđajućeg čelika ili razne slitine. Treba također nag-

lasiti da su povećanja otpora s porastom temperature za elemente od CuNi44 (konstantan) praktično zanemariva, a za slitinu CrNi iznose oko 2 %/100 K.

Može se utvrditi da se gotovo isključivo upotrebljava prirodna ventilacija, a da se prisilna ventilacija ili uljno hlađenje upotrebljavaju samo u vrlo specifičnim uvjetima.

Standardne vrijednosti dopuštenog odstupanja pojedinih otpornih elemenata iznose +/– 10 %, a kompletnog otpornika +/– 5 % pri 20 °C.

Povećanje temperature prouzrokuje povećanje otpora. Tako npr. za elemente od lijevanog željeza navedeno povećanje prema tablici 19.6–1 iznosi 7,5 %/100 K.

Otpornici se projektiraju za kratkotrajni pogon, tj. ograničeno vrijeme, a ne za slučaj trajnoga strujnog opterećenja.

Ako je vrijeme opterećenja $t_B < T_n$, mogu se dopustiti i kratkotrajna preopterećenja. Ako s a označimo faktor preopterećenja

$$a = \frac{I_a}{I_n}$$

sa strujom I_a koja je veća od nazivne struje I_n, tada iznosi najveće vrijeme preopterećenosti $t_{B\text{maks}}$ (to je vrijeme unutar kojeg dolazi do zagrijavanja koje ne prelazi dopuštene vrijednosti):

$$t_{B\text{maks}} = T_v \cdot \ln \frac{a^2}{a^2 - 1} \qquad (19.6\text{–}6)$$

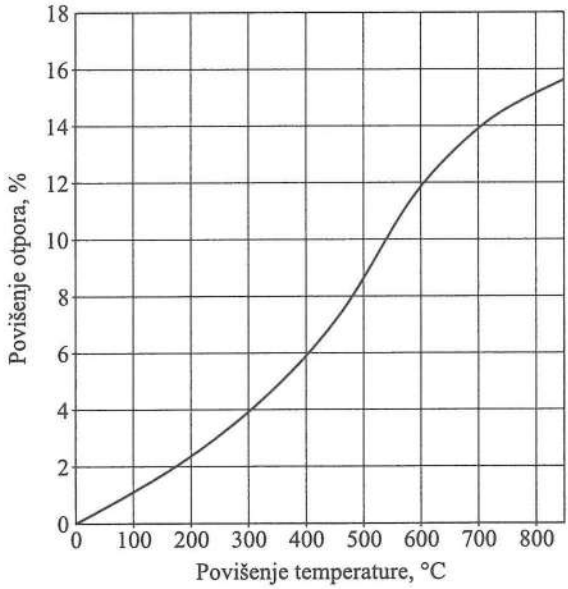
Nakon tog vremena $t_{B\text{maks}}$ potrebno je dugo vremensko razdoblje za potpuno hlađenje otpornika.

19.6.4. Iskustva poznatih svjetskih proizvođača otpornika za uzemljenje

Zanimljivo je prikazati podatke o materijalima nekih poznatih svjetskih proizvođača.

Tako npr. tvrtka GEC proizvodi otpornike od slitine nehrđajućeg čelika s 13 % kroma i 4 % aluminija. Temperaturni je koeficijent otpora 0,00016/°C pri 20 °C. Na slici 19.6–1 prikazana je promjena otpora s temperaturom.

Mali temperaturni koeficijent tog materijala osigurava mogućnost povećanja otpora manju od 2 % za 100 °C povećanja temperature. Mogućnost rada na temperaturama koje su više i od 1000 °C daje posebnu sigurnost i povećava pouzdanost pogona u odnosu na otporničke materijale koji imaju mogućnost rada na nižim temperaturama. Treba također naglasiti da standardni RP otpornici imaju vrlo mali induktivitet, koji rezultira faznim kutom od 8° između struje i napona kod pogonske frekvencije od 50 Hz. Moguće su i specijalne izvedbe s još manjim vrijednostima induktiviteta.



Sl. 19.6–1. Promjena otpora s temperaturom za RP otpornički materijal (proizvodnje »GEC«).

Treba naglasiti da u skladu s ANSI/IEEE 32 – 1972 temperatura najtoplijeg mjesta konvencionalnih otpornika za uzemljenje neutralne točke ne bi smjela prijeći 760 °C za nehrđajući čelik, odnosno 510 °C za lijevane materijale.

Tablica 19.6–2. Osnovne karakteristike raznih slitina koje tvrtka »Le Metal Deploye« primjenjuje za izradu otpornih elemenata.

Slitina	Upućivanje na normu	Otpornik $\frac{\mu\Omega \cdot cm^2}{cm}$	Temperaturni koeficijent
specijalni silikonski čelik	DIN 46400	37	2×10^{-3}
17 % krom-feritni čelik	Z. 8C. 17 X. 8CR. 17	60	$1{,}5 \times 10^{-3}$
18/10 nehrđajući čelik	A. 2CN. 1810 X2 CR. NI. 1809	72	$0{,}9 \times 10^{-3}$
tvrdi čelik	NI. CR. 30. 20	105	$(0{,}25 \ldots 0{,}40) \times 10^{-3}$
Cu-Ni legure		48	zanemariv

I neki drugi proizvođači, poput Le Metal Deploye (Francuska), proizvode otpornike sa sastavnim elementima koji mogu izdržati temperature do 1000 °C. Navedeni proizvođač ima niz različitih tipova otpornika (npr. Gridex G, Gridex N, Gridex F),

ovisno o zahtjevima (adijabatski ili neadijabatski proces zagrijavanja, prirodno ili prisilno hlađenje itd.). U skladu s tim zahtjevima u tablici 19.6–2 prikazane su i osnovne karakteristike različitih materijala (slitina) koji se upotrebljavaju kao sastavni elementi otpornika.

U tablici 19.6–3 dani su podaci o dimenzijama i cijeni metalnih otpornika navedenih triju poznatih proizvođača za nazivni napon U_n = 5,7 kV, struju I_n = 150 A i nazivno vrijeme t_n = 10 s.

Tablica 19.6–3. Usporedba osnovnih dimenzija, težina i cijena metalnih otpornika proizvodnje »GEC«, »Le Metal Deploye« i »Končar«, Hrvatska za nazivni napon U_n = 5,7 kV, struju I_n = 150 A i nazivno vrijeme t_n = 10 s.

1. (U_n = 5,7 kV; I_n = 150 A; t_n = 10 s)			
Proizvođač	»Le Metal Deploye«	»GEC«	»KONČAR«
Visina (mm)	1275	1290	2200
Širina (mm)	1300	1320	2080
Dubina (mm)	1220	1056	900
Masa (kg) (približna)	200	300	420
Cijena (%)	17,27	59,30	100

19.6.5. Sažetak

Na osnovi navedenih izračuna i podataka uputno je koristiti se navedenim iskustvima, a za detaljnije obavijesti koje su potrebne za projektiranje i izvedbu otpornika za uzemljenje srednjonaponske mreže preko djelatnog otpora treba koristiti literaturu [76], i [L4], [L8] i [L9].

Uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža složen je problem pri čijem rješavanju treba uzeti u obzir mnoge parametre. Jedan od njih su i karakteristike otpornika za uzemljenje zvjezdišta s djelatnim otporom za ograničenje struje zemljospoja na 300 A, odnosno 150 A.

Budući da su za sada za uporabu najprikladniji metalni otpornici, izvršena je njihova usporedba, i to za slučaj triju različitih proizvođača. Iz te usporedbe lako je uočiti velike tehničke i financijske razlike između otpornika domaće i strane izvedbe, što upućuje na potrebu za tehnološkim unapređenjima kod domaćih proizvođača. Za budućnost se kao najperspektivnije rješenje pojavljuju keramički otpornici, no o njima za sada nema dovoljno podataka. Značenje je pravilnog odabira otpornika za uzemljenje zvjezdišta očito – samo na području Hrvatske distribucije procjena pokazuje da bi trebalo provesti uzemljenje zvjezdišta preko 180 TS X/10(20) kV [76].

Time se potpuno opravdava potreba za tehnološkim unapređenjima u proizvodnji domaćih otpornika.

Literatura

[L1] Žutobradić, S.: *Uzemljenje zvjezdišta 10(20) kV mreža*, Energija, 6/1984.

[L2] *Propisi o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja*, Sl. list SFRJ, 19/1968.

[L3] *Prijedlog preporuka za primjenu jednofaznih metalnih otpornika za uzemljenje zvjezdišta u mrežama srednjeg napona.*

[L4] ABB (Assea Brown Boweri Aktiengesselschaft): *Switchgear Manual 8th edition*, Manheim, 1988.

[L5] Priručnik Westinghouse: *Prenos i distribucija električne energije*, Građevinska knjiga, Beograd, 1963. (prijevod)

[L6] Kataloški materijali poduzeća »Rade Končar«, »GEC«, »Le Metal Deploye«.

[L7] Nahman, J.: *Uzemljenje neutralne točke distributivnih mreža*, Naučna knjiga, Beograd, 1980.

[L8] ANSI/IEE Std 32–1972: *IEEE Standard Requirements, Terminology and Test Procedure for Neutral Grounding Devices*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1984.

[L9] Žutobradić, S., Filipović, B.: *Pregled TS 110/35/10, TS 110/10(20), TS 35/10 kV sa stanovišta uzemljenja zvjezdišta*, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1988.

19.7. UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA SREDNJONAPONSKE MREŽE 10(20) kV KOMBINACIJOM OTPORNIK–PRIGUŠNICA ZA PODRUČJA S VISOKOM OTPORNOŠĆU TLA [62]

19.7.1. Osnovne tehničke značajke kompenzacijske prigušnice

Način uzemljenja zvjezdišta napojnih transformatora 10(20) kV mreža jedan je od osnovnih parametara koji utječe na uvjete rada mreža, odabir oblika mreža, odabir relejne zaštite u elektrodistributivnom sustavu i sl. Prihvaćene tehnike uzemljenja zvjezdišta najviše ovise o karakteristikama srednjonaponskih mreža (nadzemne, kabelske ili mješovite mreže), te o vrijednostima otpornosti tla.

Za razliku od uzemljenja zvjezdišta 35 kV mreža i mreža viših naponskih razina, uzemljenje zvjezdišta 10(20) kV mreža posebno je jer transformatorske stanice od 10(20)/0,4 kV izravno povezuju niskonaponske mreže, a time i potrošačke instalacije s predmetnim 10(20) kV mrežama. Pojava kvara na 10(20) kV dijelu transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV može imati za posljedicu previsoki dodirni napon kod potrošača električne energije na niskom naponu. Stoga, važan je parametar o kojemu treba voditi računa pri odabiru načina uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreža sigurnost potrošača u pogledu moguće pojave previsokih dodirnih napona za vrijeme trajanja dozemnih kvarova u razdjelnim 10(20) kV mrežama.

Kompenzacijske prigušnice koje se danas proizvode prigušnice su s automatskom regulacijom struje prema trenutačnim uvjetima u SN mreži. Regulacija reaktivne struje prigušnice izvodi se za vrijeme pogona čime se postiže permanentno uzemljenje neutralne točke SN mreže. Općenito prema vrsti regulacije postoje prigušnice s kontinuiranom regulacijom i prigušnice sa stupnjevitom regulacijom.

Prigušnice sa stupnjevitom regulacijom tehnički su jednostavnije i u pravilu imaju veći opseg regulacije, tako da je uz korištenje iste prigušnice omogućeno proširenje i povećanje SN mreže (povećanje kapacitativne struje dozemnog spoja u mreži). Prigušnica se sastoji od paralelno spojenih segmenata (npr. za prigušnicu od 600 A izvedeni su segmenti od 40 A, 80 A, 160 A i 320 A). Osnovno načelo rada sastoji se u tome da se određenom kombinacijom uključenja pojedinih segmenata prigušnice postigne što manja preostala struja kod eventualnoga dozemnog spoja u SN mreži. Obično se proizvode za nazivne struje od 600 do 1000 A uz korake regulacije od 40 A.

Kod prigušnica s kontinuiranom regulacijom ne dolazi do nikakvih prekidanja budući se regulacija provodi jednostavnom promjenom širine zračnog raspora u magnetskom krugu prigušnice. Prigušnica se obično izrađuje s dvije pomične jezgre kako bi se postigla simetrična razdioba magnetskog polja za bilo koju poziciju jezgra. Okretanjem spiralne osovine, pomične se jezgre približavaju ili razmiču tako da se zračni raspor može namještati približno od nule do gotovo cijele visine namotaja. To rezultira širokim područjem namještanja struje (odnos od 1 do 10(12)). Pomicanje jezgri provodi se preko upravljačkog elektromotora montiranog na kućicu prigušnice, kojim se upravlja sustavom automatske regulacije ili ručno. Glavna je prednost tog tipa prigušnice mogućnost precizne regulacije prema trenutačnim uvjetima u SN mreži. Kod obje vrste prigušnica otpornik je spojen na prigušnicu preko sekundarnog namota.

19.7.2. Uvjeti uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže putem otpornika

Poznato je da kod TS 10(20)/0,4 kV koje se nalaze na terenima s visokom otpornošću tla, a napajaju se iz nadzemne 10(20) kV mreže uzemljene preko otpornika male vrijednosti, u pravilu nije moguće ispuniti propisane tehničke uvjete koji se postavljaju na dopuštene vrijednosti uzemljivača združenih uzemljenja. Nadzemni vodovi 10(20) kV u pravilu nemaju zaštitni vodič pa njihov redukcijski parametar iznosi $r_k = 1$. Isto tako i za TS 10(20)/0,4 kV koje su priključene na nadzemnu mrežu preko kratkih kabela vrijede isti tehnički uvjeti kao i za transformatorske stanice izravno priključene na nadzemnu mrežu.

Ukupni otpor združenog uzemljenja R_{zdr} transformatorske stanice TS 10(20)/0,4 kV treba ispunjavati uvjet:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{r_k \cdot I_z} \qquad (19.7\text{–}1)$$

dok za otpor zaštitnog uzemljenja ($R_{zaš}$) vrijedi:

$$R_{zaš} \leq \frac{1200}{r_k \cdot I_z} \tag{19.7–2}$$

gdje je:

r_k redukcijski faktor TS 10(20)/0,4 kV
U_d dopušteni dodirni napon, V
I_z struja zemljospoja ili jednopolnog kratkog spoja, A.

Najveće dopuštene vrijednosti otpora uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV napajanih preko nadzemnih 10(20) kV vodova uz vrijeme isključenja kvara od $t = 0{,}5$ s, te ograničenjem struje kvara na vrijednost $I_z = 150$ A, dobivaju se temeljem sljedećih izraza:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d \cdot 3 \cdot R_n}{\sqrt{3} \cdot U_n - 3 \cdot U_d} \tag{19.7–3}$$

$$R_{zaš} \leq \frac{3600 \cdot R_n}{\sqrt{3} \cdot U_n - 3600} \tag{19.7–4}$$

gdje je:

R_n nazivna vrijednost otpornika za uzemljenje zvjezdišta 10(20) kV mreže, Ω
U_n nazivni linijski napon mreže, V
R_{zdr} otpor združenog uzemljenja, Ω
$R_{zaš}$ otpor zaštitnog uzemljenja, Ω.

U formuli (19.7–2) za izračun otpora zaštitnog uzemljenja uzet je napon od 1200 V kao iznos 60 % od ispitnog napona izolacije elemenata u niskonaponskom dijelu trafostanice, koja je ispitana na podnosivi napon od 2000 V. U formuli (19.7–4) uzet je dodirni napon od 1200 V glede kriterija podnosivog napona NN opreme. Iznos je $3600 \cdot R_n$ u formuli (19.7–4) jer kroz otpornik teče trostruka struja zemljospoja.

Otpornost tla na područjima Istre na kojima su provedena mjerenja nalazila se u granicama između 100...1000 Ωm. Prema tome, radilo se o terenima s umjereno lošim karakteristikama (u odnosu na sjeverozapadni i istočni dio Hrvatske). No, to su još uvijek znatno bolji uvjeti, nego u Dalmaciji ili Primorju. Na temelju obrađenih rezultata mjerenja i praktički je potvrđena strogost tehničkih propisa koji su na snazi koji poistovjećuju dodirni napon s ukupnim potencijalom koji se pojavljuje na uzemljivaču. Naime, sukladno navedenim rezultatima proizlazi sljedeće:

- u 97,4 % slučajeva vrijedi da je $X > 2$ ($U_d < 0{,}5\ V_U$), odnosno da je dodirni napon manji od 50 % potencijala koji se pojavljuje na uzemljivaču
- u 91,4 % slučajeva vrijedi da je $X > 4$ ($U_d < 0{,}25\ V_U$), odnosno da je dodirni napon manji od 25 % potencijala koji se pojavljuje na uzemljivaču.

Uz izložene rezultate treba uzeti u obzir i realnu vjerojatnost nastanka opasnih stanja:

- vjerojatnost kvara na 10(20) kV strani TS 10(20)/0,4 kV vrlo je mala. U DP Elektroistri ta vjerojatnost iznosi za TS napajane iz nadzemne mreže: p = 1,25 kvara/ /100 TS, god. U europskim zemljama ta vjerojatnost je u pravilu nešto manja.
- trajanje jednopolnog kvara ograničeno je proradom relejne zaštite, najčešće u vremenu od t = 0,5 s.

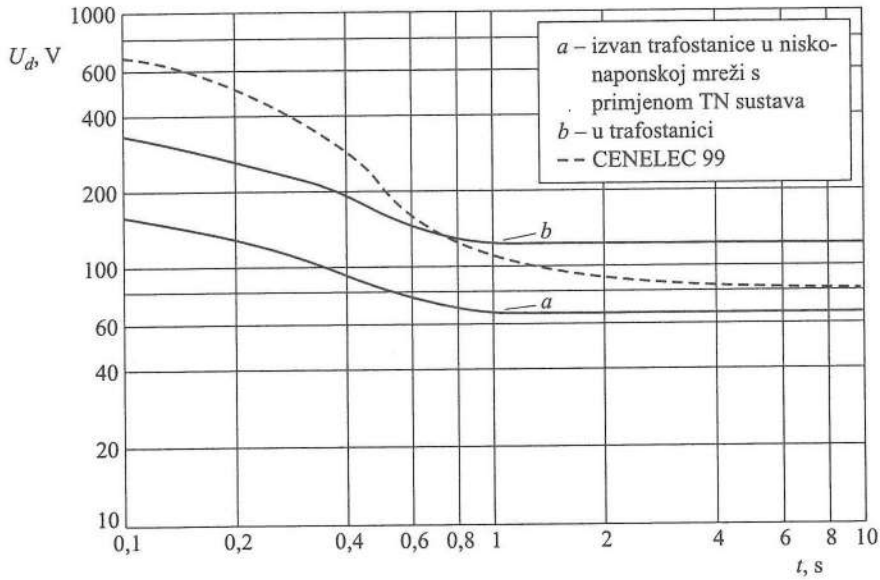
Iz izloženog proizlazi da je nužna promjena postojećih propisa, odnosno primjena europskih propisa koji obrađuju predmetno područje (CENELEC-HD 637 S1). Dvije najbitnije razlike između postojećih hrvatskih i europskih propisa odnose se na dopuštene vrijednosti dodirnog napona kao i na definiranje vrijednosti otpora združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV, koji se izračunava prema sljedećem izrazu:

$$R_{zdr} \leq \frac{X \cdot U_d}{r_k \cdot I_k}; \quad X = 2 \cdots 4 \qquad (19.7\text{–}5)$$

gdje je:

X omjer između dopuštenoga dodirnog napona U_d i potencijala uzemljivača pri zemljospoju V_u.

Parametar X prema navedenom propisu iznosi barem 2. No, dopušta se mogućnost uporabe vrijednosti $X \leq 4$. To znači da navedeni propis priznaje činjenicu da je napon dodira samo dio potencijala uzemljivača. Uz konzervativni pristup ($X = 2$) pretpostavlja se da najveći dodirni napon neće prijeći veličinu od 50 % potencijala uzemljivača, uz slobodniji pristup ($X = 4$) pretpostavlja se da najveći dodirni napon neće prijeći veličinu od 25 % potencijala uzemljivača.



Sl. 19.7–1. Dopuštene vrijednosti dodirnog napona za slučajeve a i b, prema propisima CENELEC 99.

19.7.3. Alternativno rješenje

Uzevši u obzir mjerenja i ispitivanja u [74], i uz prihvaćanje navedenih europskih propisa postojeći bi se problem riješio samo djelomično. Naime, rezultati bi za područje cijele Hrvatske bili sljedeći:

- kod 14 % ili kod 419 transformatorskih stanica od 10(20)/0,4 kV s nadzemnim napajanjem otpor združenog uzemljenja ne bi zadovoljavao ni uz prihvaćanje vrijednosti za $X = 4$,
- ako se prihvati vrijednost za $X = 2$, otpor združenog uzemljenja ne bi zadovoljavao kod 43,4 % ili kod 1238 TS 10(20)/0,4 kV s nadzemnim napajanjem.

Zbog proširenja 10(20) kV mreža te prelaska s 10 kV razine na 20 kV razinu, nužno je očekivati da će dolaziti do uzemljenja zvjezdišta preko otpornika malih vrijednosti s ograničenjem struje kvara na vrijednosti veće od $I_z = 150$ A, čime će se gornji postoci bitno povećati.

Kako bi se izbjegli relativno veliki troškovi nužni za dovođenje otpora združenih uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV unutar zadovoljavajućih vrijednosti, nameće se alternativno rješenje, a to je smanjenje ukupne struje jednopolnog kvara na niže vrijednosti korištenjem kompenzacijske prigušnice. Ograničavanjem struje jednopolnih kvarova ujedno se povećavaju najveće dopuštene vrijednosti otpora združenih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV.

19.7.4. Kombinacija otpornik–prigušnica

U postojećim TS 110(35)/10(20) kV kao zaštita od jednopolnih kvarova u 10(20) kV mrežama uglavnom se upotrebljava usmjerena zaštita od dozemnih spojeva. Osnovni princip navedene zaštite kod mreža s uzemljenim zvjezdištem preko otpornika temelji se na tzv. vatmetarskom principu rada ($V_0 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi$), za razliku od mreža s izoliranim zvjezdištem gdje se upotrebljava varmetarski princip rada ($V_0 \cdot I_0 \cdot \sin\varphi$).

Ovisno o stanju zvjezdišta moguće je na istim relejima izvršiti prebacivanje s jednog sustava na drugi (tzv. $\cos\varphi$ spoj u $\sin\varphi$ spoj) i obratno. Kako su zvjezdišta 10(20) kV mreža u Hrvatskoj, ili izolirana ili uzemljena preko otpornika redovito se upotrebljava navedena zaštita. Zbog potrebe smanjenja kapacitivne struje dozemnog spoja neutralna se točka uzemljuje preko kompenzacijske prigušnice. Slika 19.7–2 prikazuje razdiobu struja za slučaj dozemnog spoja (faza L_3) u takvoj mreži. Struje izmjerene na obuhvatnim strujnim transformatorima smještenim na počecima svakog voda, pa tako i voda u kvaru, iste su po veličini i po faznom kutu. Stoga je jasno da relejna zaštita ne može osigurati nikakvu razliku između voda u kvaru i zdravih vodova.

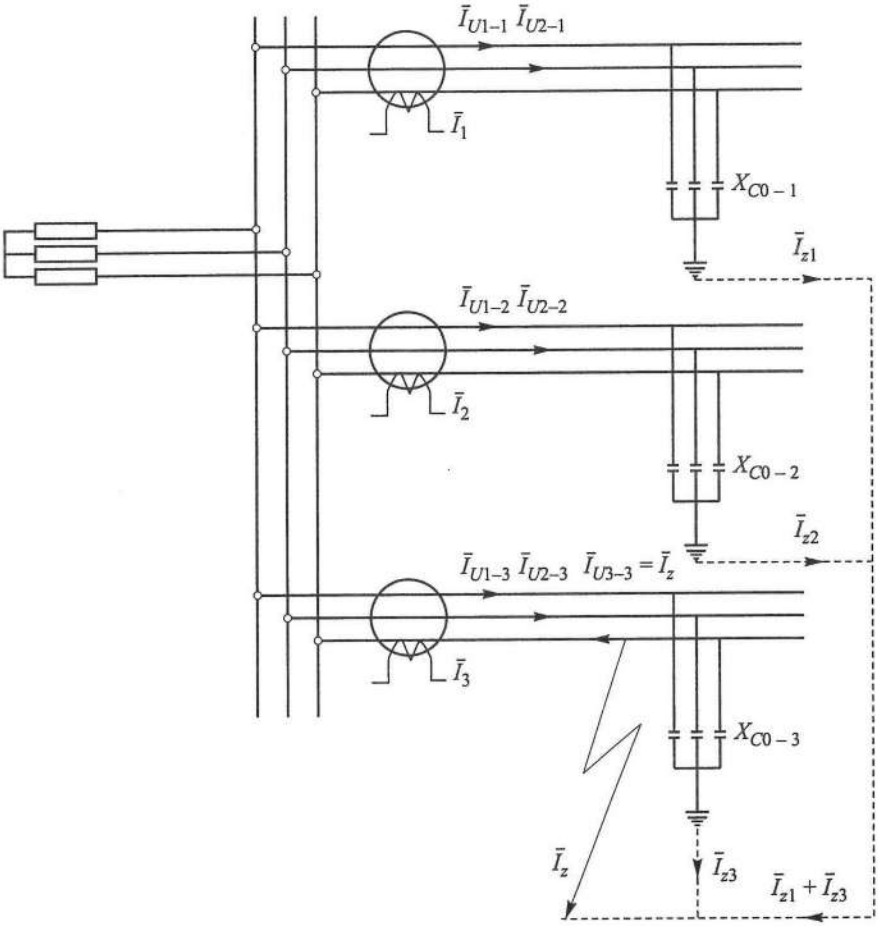
Jedno je od mogućih rješenja navedenog problema dodavanje otpornika uz kompenzacijsku prigušnicu tako da se ostvari paralelna kombinacija otpornik–kompenzacijska prigušnica. S gledišta relejne zaštite odnosno njezine funkcionalnosti i selektivnosti, uporabom dodatnog paralelno spojenog otpornika dobiva se određena vri-

jednost radne komponente struje kroz mjesto kvara. Vrijednosti navedene struje ovise dakako o vrijednosti upotrijebljenog otpornika. Ako kompenzacija kapacitivne struje nije potpuna, pojednostavljeno se struja kvara može odrediti na sljedeći način:

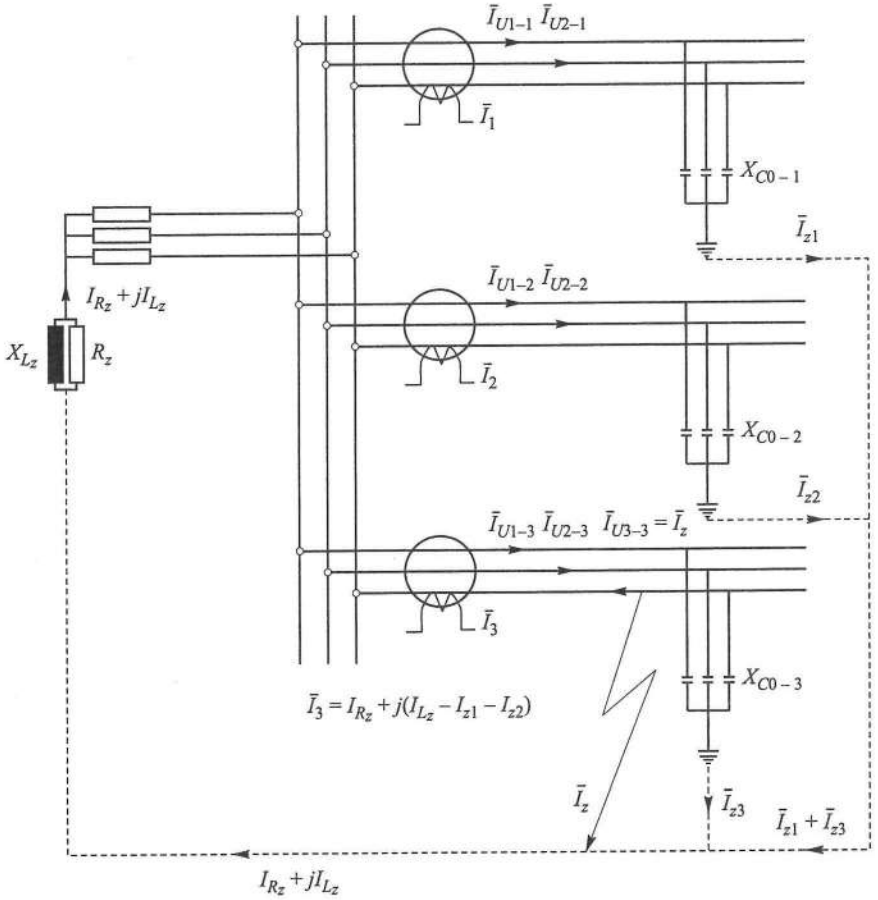
$$I_{zk} = \sqrt{I_{R_z}^2 + \left(I_z - I_{L_z}\right)^2} \tag{19.7–6}$$

gdje je:

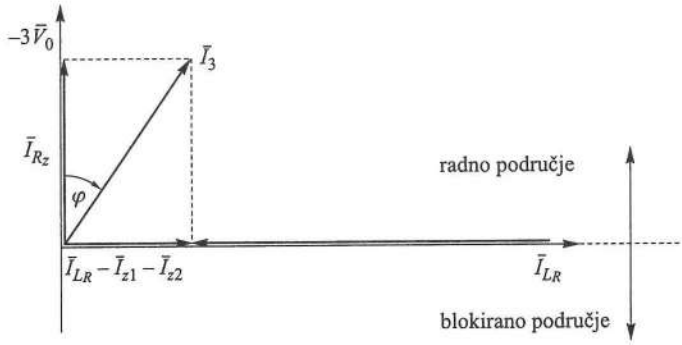
I_z struja zemljospoja ili jednopolnoga kratkog spoja, A
I_{R_z} limitirana djelatna komponenta struje zemljospoja, A
I_{zk} nekompenzirana struja zemljospoja kombinacijom otpora i prigušnice
I_{L_z} nekompenzirana kapacitivna struja zemljospoja, A.



Sl. 19.7–2. Razdioba struja dozemnog spoja u mreži s izoliranom neutralnom točkom za tri odvoda koji su spojeni na iste sabirnice 10(20) kV mreže.



Sl. 19.7–3. Shema uzemljenja zvjezdišta preko paralelne kombinacije otpornik–kompenzacijska prigušnica te razdioba struja za slučaj zemnog spoja za tri odvoda koji su spojeni na iste sabirnice 10(20) kV mreže.



Sl. 19.7–4. Vektorski dijagram struja i napona kod paralelne kombinacije otpornik–prigušnica.

Za razliku od varijante bez otpornika, kroz obuhvatni strujni transformator izvoda u kvaru protječe i radna komponenta struje kvara, dok kroz ostale izvode navedena struja ne prolazi, što je dovoljno za selektivnu proradu relejne zaštite.

Radna komponenta struje kvara ipak ne bi smjela imati premali iznos (ispod 30 A), zbog eliminiranja svih pogrešaka i smetnja u sustavu te postizanja selektivnosti relejne zaštite kod jako dugih vodova koji imaju znatne iznose kapacitivne struje prema zemlji.

19.7.5. Sažetak

Izložene aktualne probleme vezane uz uzemljenje zvjezdišta 10(20) kV mreža u Hrvatskoj potrebno je početi rješavati i to u prvom redu prihvaćanjem europskih norma koje obrađuju navedenu problematiku. Kako se jednostavnim prihvaćanjem navedenih norma problem rješava samo djelomično, potrebno je početi primjenjivati suvremena tehnološka rješenja kao što je kompenzacijska prigušnica, koja se u najrazvijenijim zemljama Europe pokazala kao kvalitetno rješenje.

Ako se uz sve navedeno upotrebljavaju i suvremeni sustavi zaštite od dozemnih spojeva, ne samo da će se uvelike olakšati ispunjavanje propisa o previsokim dodirnim naponima (ekonomski efekti), nego će se i uvelike smanjiti vrijeme trajanja kvarova, a time i poboljšati kakvoća isporuke električne energije, koja će u bliskoj budućnosti sigurno imati daleko veću ulogu nego što ju je imala dosada.

Literatura

[L1] ALSTOM: *Application of Sensitive Earth Fault Relays to Petersen Coil Earthed and Insulated Power Systems*, www.alstom.com, 1999.

[L2] CENELEC: *Power instalations exceeding 1 kV a.c.*, Brussels, may 1999.

[L3] Damianić, M.: *Analiza parametara uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže*, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet elektrotehnike i računarstva, siječanj 2001.

[L4] Druml, G.: *Detecting High-Ohmic Earth Faults in Compensated Networks*, Trench Austria GmBH, 1999.

[L5] Pietzsch, H., Roman, H.: *Earth-fault treatment in medium-voltage networks*, CIRED 97, Conference Publication No. 438, 1997.

[L6] TRENCH AUSTRIA: *Neutral Point Treatment; Earthfault Protection-Compensated Networks; EPSY Earthfault Protection System – Electronic Components*, Trench Publication, 1999.

[L7] Žutobradić, S., Damianić, M.: *Koncepcija uzemljenja zvjezdišta mreža 10(20) kV u budućnosti*, ENERGIJA br. 1, Zagreb, veljača 1999.

20. ISPITIVANJE UZEMLJENJA ELEKTROENERGETSKIH POSTROJENJA VISOKOG NAPONA

Pouzdan i ispravan rad pogona, te sigurnost osoblja i okoline osnovni su zahtjevi postojeće tehničke regulative o elektroenergetskim postrojenjima u slučaju pojave dozemnoga kratkog spoja. Pri pojavi dozemnoga kratkog spoja uzemljivač elektroenergetskog postrojenja poprimi povišen potencijal prema neutralnoj zemlji. Također je potencijal unutar i izvan postrojenja povišen. Visina i raspodjela potencijala unutar i izvan postrojenja, trajanje kratkog spoja, uklopno stanje mreže i veličina struje dozemnoga kratkog spoja faktori su koji izravno utječu na spomenutu sigurnost osoblja i pogona.

Proračunima i teorijskim razmatranjima nemoguće je predvidjeti sve moguće utjecaje na nekom određenom uzemljivaču. Zbog toga je potrebno nakon izvedbe uzemljivača, periodično tijekom eksploatacije provoditi mjerenja i ustanoviti je li i u kolikoj mjeri ugrožena sigurnost ljudi i okoline pri pojavi dozemnoga kratkog spoja. Kod novih objekata mjerenja daju i odgovore o ispravnosti projekta i izvedbe uzemljivača, pa i fizički provjeravaju projektirane veličine. Tijekom eksploatacije periodička ispitivanja uzemljivača otkrivaju promjene u tlu i izvan njega.

20.1. METODE MJERENJA

Mjerenje otpora uzemljenja, odnosno impedancije uzemljivača, za postrojenja nazivnog napona većeg od 1000 V [16] provodi se izmjeničnim naponom, mjerenjem struje i napona.

Princip *U–I* metode sastoji se u tome da se narinućem izmjeničnog napona mrežne frekvencije između ispitivanog i pomoćnog uzemljivača uvede u ispitivani sustav uzemljenja mjerna struja I_{mj} koja prouzrokuje mjerljivo podizanje potencijala (metoda se naziva *current-injection method* [L1]). Udaljenost između ispitivanog i pomoćnog uzemljivača ne smije biti manja od 5 km (što ovisi prije svega o izmjerama uzemljivača, pa je propisima ta udaljenost određena peterostrukom najvećom protegnošću uzemljivača, dakako, to je dovoljno samo u jednostavnijim slučajevima. Unutarnji otpor voltmetra kojim se mjeri napon između uzemljivača i naponske uzemljivačke sonde, mora biti najmanje deset puta veći od otpora uzemljenja sonde. Pri mjerenju napona uzemljivača, dodirnog napona i napona koraka mogu nastati pogreške zbog stranih napona i napona smetnja (npr. induktivni utjecaj dugačkih mjernih vodova, induktivni utjecaj krugova ispitne struje zbog susjednih sustava u pogonu).

Prema literaturi [L1] [72] navode se četiri metode eliminacije utjecaja smetnja:

a) Metoda titranja

Ova je metoda provediva u postrojenju u kojem postoji agregat za vlastitu potrošnju ili za nužno napajanje, čija frekvencija pri ispitivanju odstupa od frekvencije mreže (50 Hz) za nekoliko desetina herca. Naponi koje izaziva mjerna struja vektorski se zbrajaju s naponom smetnje U_s, čiji se iznos i fazni položaj pri dovoljno kratkom trajanju mjernog ciklusa može smatrati konstantnim. Zbog asinkrone superpozicije njiše se kazaljka voltmetra između najveće i najmanje vrijednosti U_1 i U_2. Napon koji izaziva mjerna struja tada iznosi:

$$U_T = \frac{U_{1T} + U_{2T}}{2} \quad \text{za } 2U_s < U_1 \tag{20.1–1}$$

$$U_T = \frac{U_{1T} + U_{2T}}{2} \quad \text{za } 2U_s > U_1 \tag{20.1–2}$$

$$U_T = \frac{U_{1T}}{2} \quad \text{za } 2U_s = U_1 \tag{20.1–3}$$

gdje je:

U_{1T} izmjereni najveći napon
U_{2T} izmjereni najmanji napon
U_s napon smetnje
U_T prosječni izmjereni napon.

b) Vektorsko mjerenje

Dulji naponski mjerni vodovi moraju, po mogućnosti biti vođeni okomito na ispitni vod. Ako to iz prostornih razloga nije moguće, može se udio napona što ga u mjernom vodu inducira mjerna struja eliminirati mjeračem vektora.

c) Deblokiranje istosmjernih struja

Ako naponi smetnja pokazuju visoke udjele istosmjernog napona, može biti potrebna uporaba voltmetra, kod kojeg se istosmjerni napon deblokira.

d) Metoda promjene polariteta

Ovdje se upotrebljava izmjenični napon frekvencije 50 Hz iz mrežnoga energetskog transformatora. Utjecaj napona smetnje eliminira se promjenom polariteta mjerne struje. Metoda se sastoji u sljedećem:

- izmjeri se napon uzemljivača U_1 i mjerna struja I_1 kod jednog smjera mjerne struje
- okrene se smjer mjerne struje za 180° električnih i izmjeri se napon U_2 i mjerna struja I_2
- prekine se tok mjerne struje i izmjeri napon smetnje U_s i struja smetnje I_s.

Na temelju vektorskih odnosa vrijede sljedeći izrazi za mjerni napon U_{mj} i mjernu struju I_{mj}:

$$U_{mj} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2} - U_s^2} \qquad (20.1\text{–}4)$$

$$I_{mj} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2} - I_s^2} \qquad (20.1\text{–}5)$$

Impedancija ispitivanog uzemljivača Z tada iznosi:

$$Z = \frac{U_{mj}}{I_{mj}} \qquad (20.1\text{–}6)$$

20.2. NAČIN ISPITIVANJA

Shema mjerenja otpora uzemljenja *U–I* metodom promjene smjera struje prikazana je na slici 20.2–1. Prema shemi mjerenja pri ispitivanju uspostavlja se sljedeći mjerni krug:

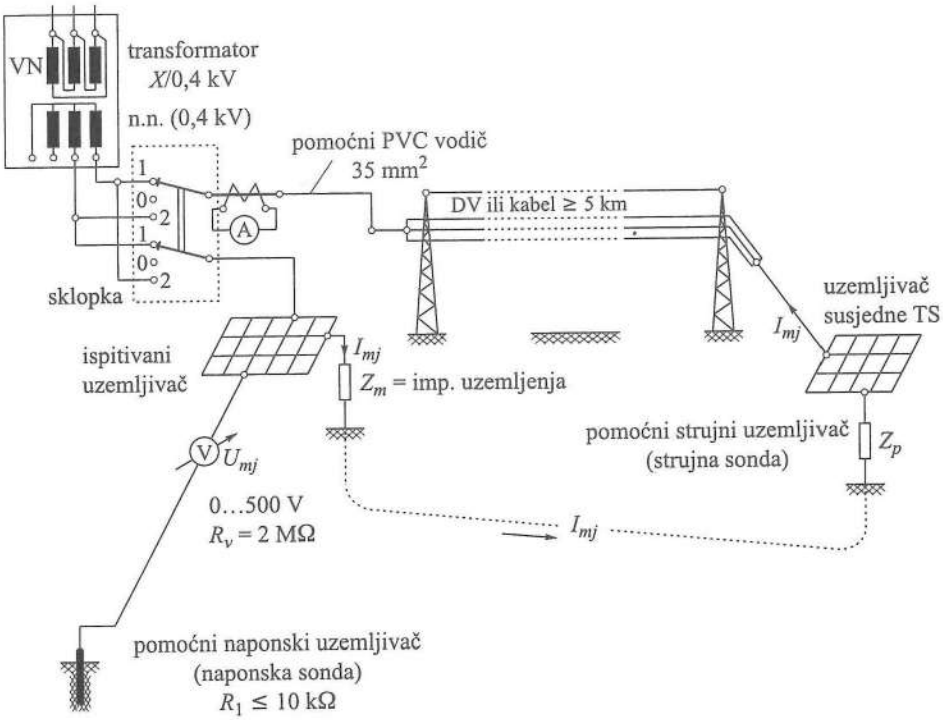
– ispitivani uzemljivač – izvor – mjerni uređaj – vod mjerne struje – pomoćni uzemljivač – zemlja – ispitivani uzemljivač.

Kao vod mjerne struje uzima se redovito dalekovod ili kabel, pri čemu treba voditi brigu o tome da se jedan dio mjerne struje vraća putem zaštitnog užeta ili plašta kabela. Redukcijski faktor r_k voda mjerne struje može se odrediti mjerenjem ili računanjem. Za vod bez armature $r_k = 1$.

Uporaba navedene *U–I* metode, opisane u odsječku 20.1., s otklanjanjem utjecaja stranih napona i napona smetnji metodom promjene polariteta, prihvatljiva je u praksi iz više razloga:

- redovito postoji mogućnost uporabe mrežnoga energetskog transformatora kao izvora mjerne struje
- na niskonaponskoj strani transformatora redovito se postižu mjerne struje od 50 A na više, što omogućuje mjerljivo podizanje potencijala

– ovisno o postignutoj vrijednosti mjerne struje može se upotrijebiti izmjenični napon od 220 ili 380 V.



Sl. 20.2–1. Principna shema mjerenja *U–I* metodom na mrežastom uzemljivaču.

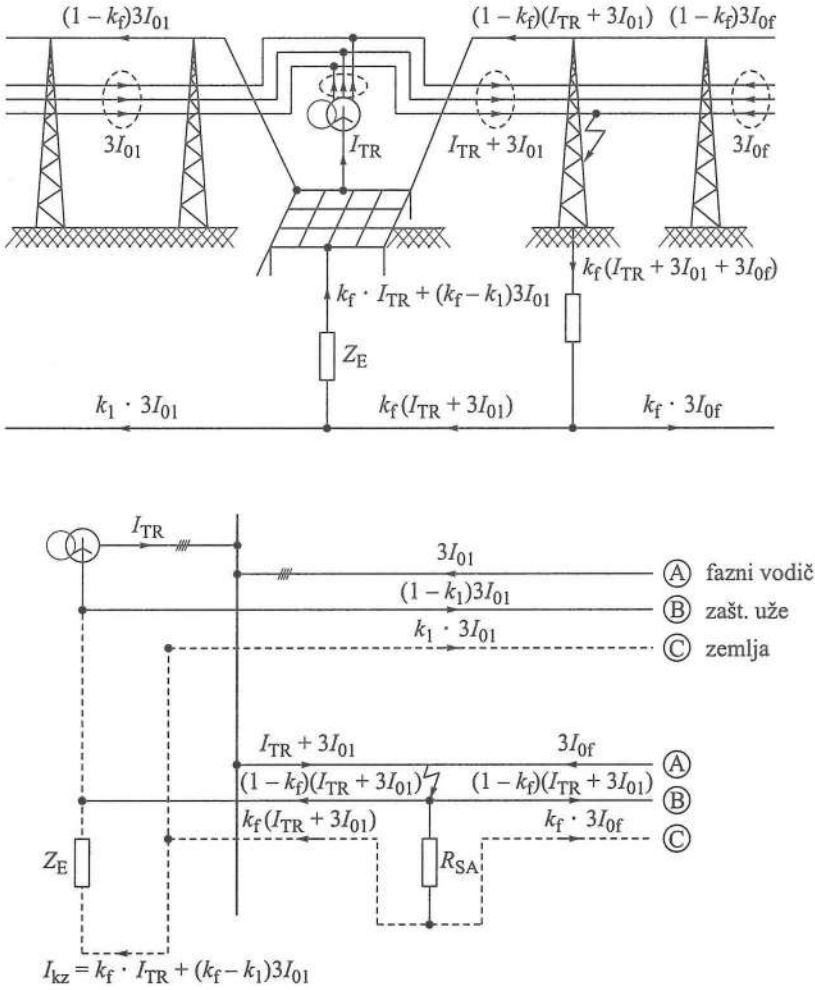
Za priključak elektronskog voltmetra radi mjerenja potencijala uzemljivača upotrebljava se suosni kabel koji se polaže sve do udaljenosti prestanka porasta potencijala, te elektronski voltmetar unutarnjeg otpora 2 MΩ s pogreškom mjerenja manjom od 1 %. Mjerenje struje obavlja se s pomoću mjernoga strujnog transformatora razreda 0,2 i ampermetrom točnosti 1 %.

S opisanim strujnim krugom, slika 20.2–1, mjeri se i dodirni napon i napon koraka prema odredbama VDE 0141 jer naši propisi [16] ne određuju i ne opisuju načine mjerenja. Mjerenje se obavlja elektronskim voltmetrom unutarnjeg otpora 1 kΩ, što predstavlja nadomjesni otpor ljudskog tijela. Način mjerenja dodirnog napona potanko je opisan u [72]. Mjerne elektrode imaju dodirnu površinu od 400 cm^2, a na tlo su pritisnute najmanjim pritiskom od 500 N. Pri mjerenju dodirnog napona elektrode se postave na mjesto stajanja koje je 1 m udaljeno od dijela postrojenja izloženog dodiru. Za oponašanje ruku upotrebljava se šiljasta elektroda. Napon koraka mjeri se na razmaku noga–noga od 1 m.

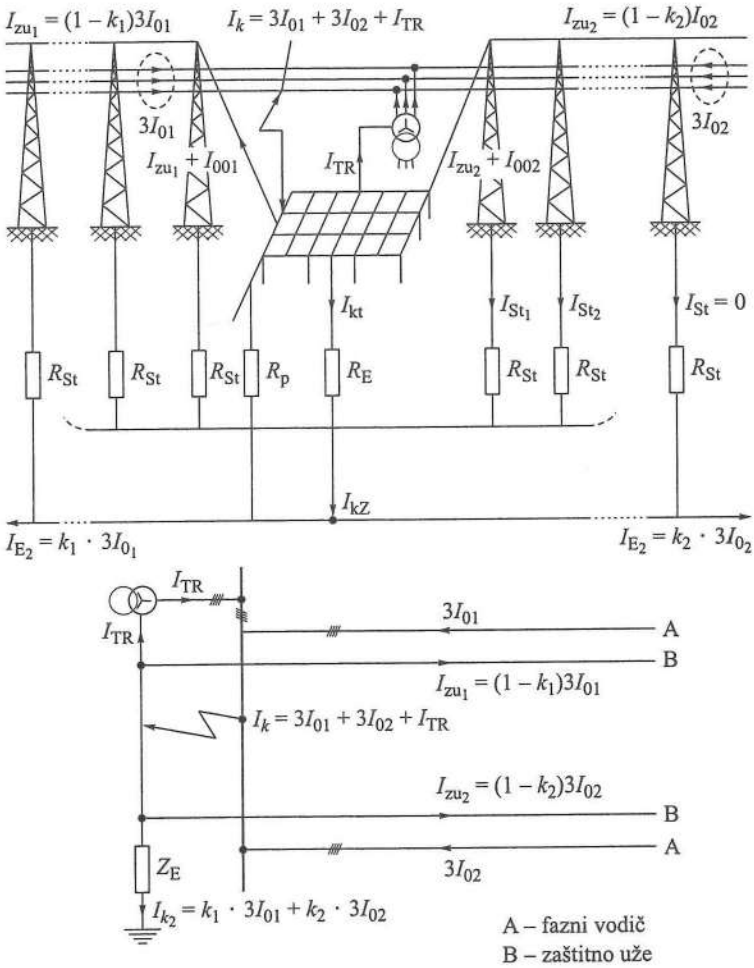
20.3. ODREĐIVANJE STRUJE MJERODAVNE ZA PODIZANJE POTENCIJALA

20.3.1. Utjecajni faktori za dimenzioniranje postrojenja i uzemljivača

Pri dimenzioniranju uzemljivača mjerodavna je struja za termički proračun ukupna struja jednopolnoga kratkog spoja jer ova protječe kroz užad uzemljivača od mjesta kratkog spoja pa mjesta grananja u zaštitnu užad i u zemlju.



Sl. 20.3–1. Raspodjela struje jednopolnoga kratkog spoja za slučaj kvara u blizini postrojenja – princip i nadomjesna shema.



Sl. 20.3–2. Raspodjela struje jednopolnoga kratkog spoja za slučaj kvara u postrojenju – princip i nadomjesna shema za slučaj ulaza 2 voda.

Jedno je od pitanja pri dimenzioniranju uzemljivača koja je struja, početna ili prijelazna, jednopolnog kratkog spoja mjerodavna za termičku opteretivost. Poznato je, naime, da je u blizini izvora početna struja i do 20 % veća od prijelazne, da bi daleko od izvora te dvije struje bile gotovo jednake. VDE propisi [16] izričito naglašuju da je mjerodavna početna izmjenična struja jednopolnog kratkog spoja.

Naši propisi [16] u članku 103 za mreže s izravno uzemljenim zvjezdištem određuju, iako na vrlo nejasan način, da se uzemljivač dimenzionira na struju dozemnoga kratkog spoja koja protječe kroz uzemljenje 0,25 s nakon nastanka kratkog spoja – dakle uzemljivač se mora dimenzionirati za prijelaznu struju jednopolnoga kratkog spoja. Mnogi pogrešno shvaćaju taj propis kao vrijeme mjerodavno za određivanje dodirnog napona prema članku 111 – kao da se s propisom može općenito odrediti

koliko je vrijeme iskapčanja struje kvara. Poznavajući osnovne podatke o raspodjeli i vrijednostima struja jednopolnoga kratkog spoja može se odrediti koji dio teče kroz uzemljivač u zemlju i podiže njegov potencijal prema referentnoj zemlji.

Točan proračun dijela struje kvara koja se zatvara kroz uzemljivač u zemlju može se izvršiti prema [3] i [4], ili prema navodima u [L1] i [L2]. Prikaz raspodjele struje jednopolnoga kratkog spoja za jednostavan slučaj (dva voda i jedan transformator u postrojenju) dan je na slikama 20.3–1 i 20.3–2. Potrebno je dakle razmatrati dva slučaja:

a) kratki spoj u postrojenju
b) kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja.

20.3.2. Kratki spoj u postrojenju

Ukupna struja jednopolnoga kratkog spoja I_k može se prikazati kao zbroj struja jednopolnoga kratkog spoja bez uzemljenja zvjezdišta transformatora I_{TR} i zbroja udjela u struji kratkog spoja pojedinih dalekovoda I_{kj}:

$$I_k = I_{TR} + \sum_j I_{kj} \tag{20.3–1}$$

gdje je:

I_k ukupna struja jednopolnoga kratkog spoja
I_{kj} struja kratkog spoja pojedinih vodova
T_{TR} struja kroz uzemljenje zvjezdišta transformatora.

Poznato je, a iz slike 20.3–1 to se i vidi, da se struja I_{TR} ne zatvara preko uzemljivača u zemlju, već samo kroz užad uzemljivača od mjesta kratkog spoja do uzemljenog zvjezdišta transformatora. Ta struja dakle ne sudjeluje u podizanju potencijala uzemljivača, ali se obvezatno mora uzeti u obzir za termički proračun uzemljivača.

Struja koja dolazi kroz uzemljivač u zemlju, može se prikazati ovim izrazom:

$$I_{kz} = \sum_j I_{kj} - \sum_j I_{zuj} \tag{20.3–2}$$

gdje je:

I_{zuj} struja u zaštitnom užetu j-tog dalekovoda.

Razmotrimo nadalje utjecaj zaštitne užadi na veličinu struje jednopolnoga kratkog spoja u zemlji. Izraz za veličinu struje u zaštitnom užetu kod nekog n-tog stupa (za promatrani j-ti dalekovod) je:

$$\left(I_{zuj}\right)_n = \left(1 - k_j\right) I_{kj} + \beta_j I_{kzo} e^{n\gamma} \tag{20.3–3}$$

gdje je:

k_j redukcijski faktor zaštitnog užeta j-tog dalekovoda
β_j faktor odvoda j-tog dalekovoda
I_{kzo} struja kratkog spoja pri uzimanju u obzir samo redukcijskog faktora zaštitnog užeta, računa se po formuli (20.3–4)

$$I_{kzo} = \sum_{j}^{1} k_j I_{kj} \tag{20.3–4}$$

γ_j konstanta odvoda j-tog dalekovoda (prijenosna konstanta voda).

Iz (20.3–3) vidi se da se struja u zaštitnom užetu sastoji od dvije komponente. Prva komponenta određena je ukupnom strujom jednopolnoga kratkog spoja u faznim vodičima tog dalekovoda i redukcijskim faktorom zaštitnog užeta definiranog poznatim izrazom:

$$k = 1 - \left(\frac{Z_{ag}}{Z_{gz}} \right) \tag{20.3–5}$$

gdje su Z_{ag} i Z_{gz} nulte impedancije zamki između vodiča i zaštitnog užeta, odnosno zaštitnog užeta i zemlje (podrobnije o tome npr. u [L4]). Ta je komponenta inducirana komponenta struje u zaštitnom užetu (nastaje zbog međuaktivnog djelovanja zaštitnog užeta i faznih vodiča kroz koje protječe struja kvara). Iz (20.3–3) vidi se da se ta komponenta smatra jednakom duž cijelog voda. Druga je komponenta struja odvoda zaštitnog užeta: iz eksponencijalne ovisnosti o broju stupova (dakle udaljenosti od stanice) lako se zaključuje da s udaljenošću od stanice opada. Razumljivo je da je struja odvoda putem zaštitnog užeta i uzemljivača stupova u zemlji kod trafostanice najveća. Njezina apsolutna vrijednost ovisi prije svega o faktoru odvoda, koji je jednak omjeru ekvivalentne vodljivosti uzemljenja sustava i za kojeg izraz iz [L9] glasi:

$$\beta = \frac{\dfrac{1}{Z_v} - \dfrac{1}{2R_{st}}}{\dfrac{1}{R_z} + \left(\dfrac{1}{Z_{vj}} - \dfrac{1}{2R_{stj}} \right)} \tag{20.3–6}$$

a onda i o konstanti odvoda γ koja se može izračunati po formuli iz [L9]:

$$\gamma = \operatorname{arch}\left(1 + \frac{Z_{uz}}{2R_{st}} \right) \tag{20.3–7}$$

gdje je :

Z_v valna impedancija dalekovoda
R_{st} otpor uzemljenja stupa dalekovoda
R_z otpor uzemljenja uzemljivača stanice
R_{stj} otpor uzemljenja stupa j-tog dalekovoda
Z_{uz} impedancija uzemljenja stanice
β ekvivalentna vodljivost uzemljenja sustava

$$Z_v = 2R_{st} \frac{Z_{uz}}{Z_{uz} + 4R_{st}} \tag{20.3–8}$$

Iz ovog se prikaza vidi da je točno računanje struje odvoda dosta složeno i nepouzdano jer se upotrebljavaju mnogi pretpostavljeni podaci (npr. otpor uzemljenja stupa) i zbog toga što se lokalne prilike (homogenost tla, vlažnost, otpori uzemljenja) stalno mijenjaju, pa je teško pronaći optimalnu vrijednost.

Zbog svega toga ni današnji propisi VDE [72], ni preporuke Međunarodnog tehničkog komiteta CIGRE [L1] ne uzimaju u obzir struju odvoda, već računaju samo s induciranom komponentom. Pri tome se čini određena pogreška, no ona je zanemariva. Dapače, rezultat doprinosi sigurnosti jer je tako izračunana struja nešto veća od stvarne vrijednosti. Prema tome, kod kratkog spoja na sabirnicama u postrojenju struja se kroz uzemljivač postrojenja određuje kao vektorski zbroj umnožaka trostrukih nultih struja u vodičima i pripadajućih faktora redukcije zaštitnih užeta:

$$I_{kz} = I_{kzo} = \sum_j k_j I_{kj} \tag{20.3–9}$$

20.3.3. Kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja

U drugom slučaju kod kratkog spoja izvan postrojenja (bliski kratki spoj – rjeđi slučaj, vidi sliku 20.3–2) struja kroz uzemljivač postrojenja određuje se uz zanemarivanje nadomjesnih impedancija voda između (bliskog) bolesnog čvorišta i zamišljenog mjesta kvara:

$$I_{\mathrm{kz}} = k_{\mathrm{maks}} I_{\mathrm{TR}} + \sum_j \left(k_{\mathrm{maks}} - k_j\right) I_{kj} \tag{20.3–10}$$

gdje je:

- k_j redukcijski faktor zaštitnog užeta j-tog voda
- k_{maks} najveći redukcijski faktor zaštitne užadi za sve vodove neposredno priključene na postrojenje
- I_{kj} struja kratkog spoja u vodičima j-tog voda
- I_{TR} struja kratkog spoja iz neposredno priključenih (blok) transformatora
- I_{kz} struja kvara kroz uzemljivač postrojenja.

Za dimenzioniranje uzemljivača promatrane stanice, s obzirom na dodirni napon i napon koraka, mjerodavna je veća od tih dviju struja (koje se pojavljuju kod kratkog spoja ili u postrojenju ili u blizini na jednom od priključnih dalekovoda).

Najveća struja koja prolazi kroz uzemljivač postrojenja određuje se kao veća od izračunanih vrijednosti struja jednopolnoga kratkog spoja u postrojenju, odnosno izvan postrojenja (bliski kratki spoj).

20.4. OSVRT NA PROPISE I PREPORUKE

Naši propisi za elektroenergetska postrojenja napona većeg od 1000 V iz 1974. godine [16] već su zastarjeli nakon dvije godine, kada je Njemačka u suglasnosti sa

Švicarskom i Austrijom izdala nove [72]. Najveći su nedostatak naših propisa dopuštene veličine dodirnog napona i napona koraka, koje su znatno manje u odnosu na propise VDE-a. Dopušteni dodirni napon određen je hrvatskom normom HD 637 S1:1999 primjenom dijagrama slika P9–4 (Prilog P9). Dopušteni dodirni napon u ovisnosti je od trajanja struje zemljospoja u visokonaponskim postrojenjima i za $t \leq 0{,}7$ s, $U_d = 140$ V. Za $t \leq 0{,}5$ s kako je obično podešenje zemljospojne zaštite, $U_d = 210$ V te za $t \geq 5$ s, u visokonaponskim postrojenjima gdje nema zemljospojne zaštite, $U_d = 80$ V.

Prijedlog je u skladu s VDE-om [72], s time što je u propisima VDE-a izostavljen napon koraka. Tako, primjerice po novom prijedlogu Pravilnika [47] osim toga se navode obvezatne vrste mjerenja i njihovu učestalost kod različitih uzemljenja objekata tijekom eksploatacije.

Literatura

[L1] *Station Earthing – Safety and Interference Aspects*, Electra, No 71, July 1., 1980.

[L2] *Safe Substation Grounding – Part 1*, IEEE Transactions, Vol. PAS – 97, No. 11/ 1978.

[L3] Miličević, A.: *Uvod u proračun uzemljenja elektroenergetskih objekata*, Energija, br. 9–10, 1977.

[L4] Marković, B.: *Zaštitno uže na vodovima 110 i 220 kV*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1963.

[L5] Kučak, J., Mužny, J.: *Mjerenje na uzemljivaču HE Orlovac*, Protokol o ispitivanju br. 2681/1973, IE Zagreb

[L6] Kučak, J.: *Mjerenje na uzemljivaču novoizgrađene elektrolize TLM Boris Kidrič – Ražine*, Protokol o ispitivanju br. 2730/1973, IE Zagreb

[L7] Mihalić, D.: *Ispitivanje uzemljenja 110/20 kV Lovran – Analiza utjecaja dozemnog kratkog spoja na okolinu*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1983.

[L8] Kučak, J.: *Uzemljenje zvjezdišta mreže 30 kV Jarun, aktualizacija studije iz godine 1975. II dio: Uzemljivač i postrojenja*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1985.

[L9] Kučak, J.: *Uzemljenje zvjezdišta mreža 30 kV napajanih iz TS 110/30/10 kV Resnik I TE-TO, aktualizacija studije iz godine 1975.*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1985.

[L10] Jung, M., Kučak, J.: *Visokonaponska ispitivanja i mjerenje potencijala uzemljivača nekih TS 30/10 kV u mrežama Resnik i TE-TO*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1986.

[L11] Jung, M., Kučak, J.: *Mjerenje i ispitivanje utjecaja struja jednopolnih kratkih spojeva na HPT postrojenja u okolici TS Melina i TS Krasica*, Elaborat Instituta za elektroprivredu, Zagreb, 1982.

21. PRORAČUN OTPORA UZEMLJENJA I RAZDIOBE POTENCIJALA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA *CYMGRN* ZA RAZLIČITE VRSTE UZEMLJIVAČA

Programski paket tvrtke EYME IMENMXTOM ustupljen je Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku za potrebe nastavno-razvojnih projekata i uporabu u ovoj knjizi za izobrazbu stručnjaka prikazujući mogućnost uporabe računala za izračune otpora uzemljivača i razdiobe potencijala oko uzemljivača.

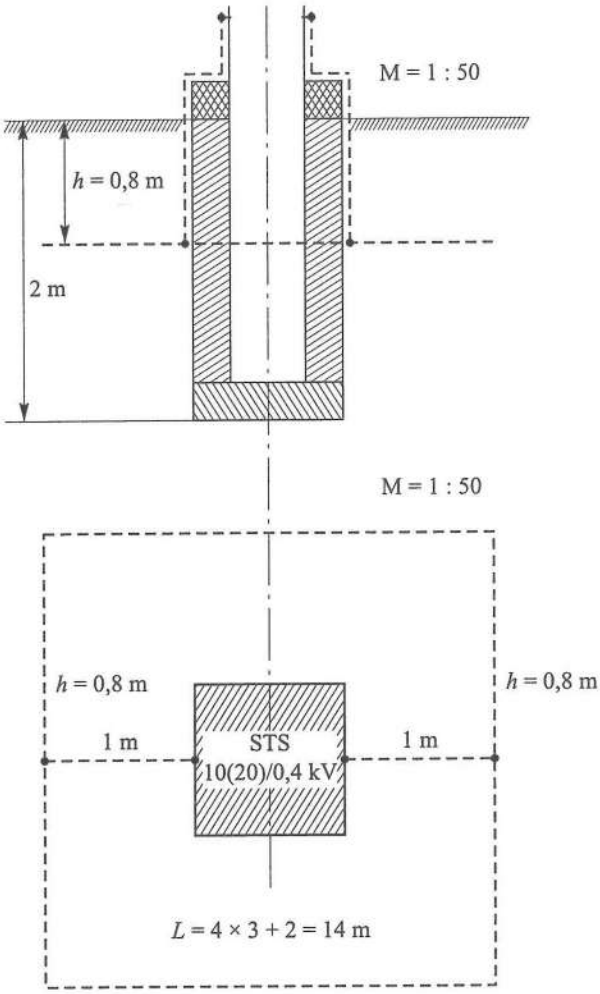
Za primjere su uzeti tipski i najčešće primjenjivani uzemljivači s različitim konfiguracijama trakastih uzemljivača uz uporabu štapnih uzemljivača za otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$ te za izoliranu neutralnu točku 10(20) kV mreže, za uzemljenje putem otpora i ograničenje struje zemljospoja na 300 A, te za izravno uzemljenje neutralne točke mreže 110 kV i uzemljenje stupova dalekovoda.

21.1. UZEMLJENJE STUPNE TS 10(20)/0,4 kV ZA IZOLIRANU NEUTRALNU TOČKU

Izračunajte otpor uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala uzemljivača stupne transformatorske stanice koji je izveden s jednokonturnim uzemljivačem prema slici 21.1–1, a za sljedeće podatke:

- nije ugrađena zemljospojna zaštita, već samo signalizacija zemljospoja
- otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja zemljospoja $I_z \leq 20$ A
- uzemljivač je izveden s jednim konturnim i uzemljivačem od željezne pocinčane trake 25 mm × 4 mm. Uzemljivač je položen u dubinu $h = 0{,}8$ m

- ukupna duljina trakastog uzemljivača $L = 14$ m
- ne računamo duljinu spojnog voda do trakastog uzemljivača.



Sl. 21.1–1. Nacrt uzemljivača stupne TS 10(20)/0,4 kV

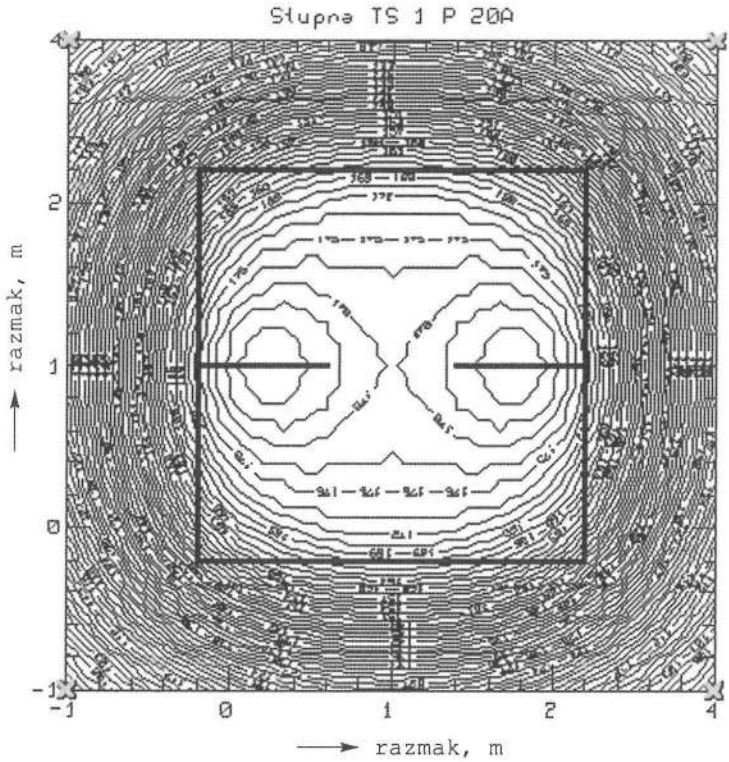
```
REZULTATI PRORAČUNA
=====================================================================

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element  X1  Y1  Z1  X2  Y2  Z2  Duljina,m  Polumjer,m  Struja,A
---------------------------------------------------------------------
0001     0.0 1.5 0.8 1.0 1.5 0.8    1.00       0.0057      1.2217
0002     0.0 1.5 0.8 0.0 3.0 0.8    1.50       0.0057      2.1148
```

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0003	0.0	3.0	0.8	1.5	3.0	0.8	1.50	0.0057	2.2677
0004	3.0	1.5	0.8	2.0	1.5	0.8	1.00	0.0057	1.2217
0005	3.0	1.5	0.8	3.0	3.0	0.8	1.50	0.0057	2.1148
0006	1.5	0.0	0.8	3.0	0.0	0.8	1.50	0.0057	2.2677
0007	0.0	0.0	0.8	1.5	0.0	0.8	1.50	0.0057	2.2677
0008	0.0	0.0	0.8	0.0	1.5	0.8	1.50	0.0057	2.1148
0009	3.0	0.0	0.8	3.0	1.5	0.8	1.50	0.0057	2.1148
0010	1.5	3.0	0.8	3.0	3.0	0.8	1.50	0.0057	2.2677

UKUPNA DULJINA VODIČA : 14.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA (GPR) : 266.58 V

OTPOR UZEMLJIVAČA : 13.3468 Ω



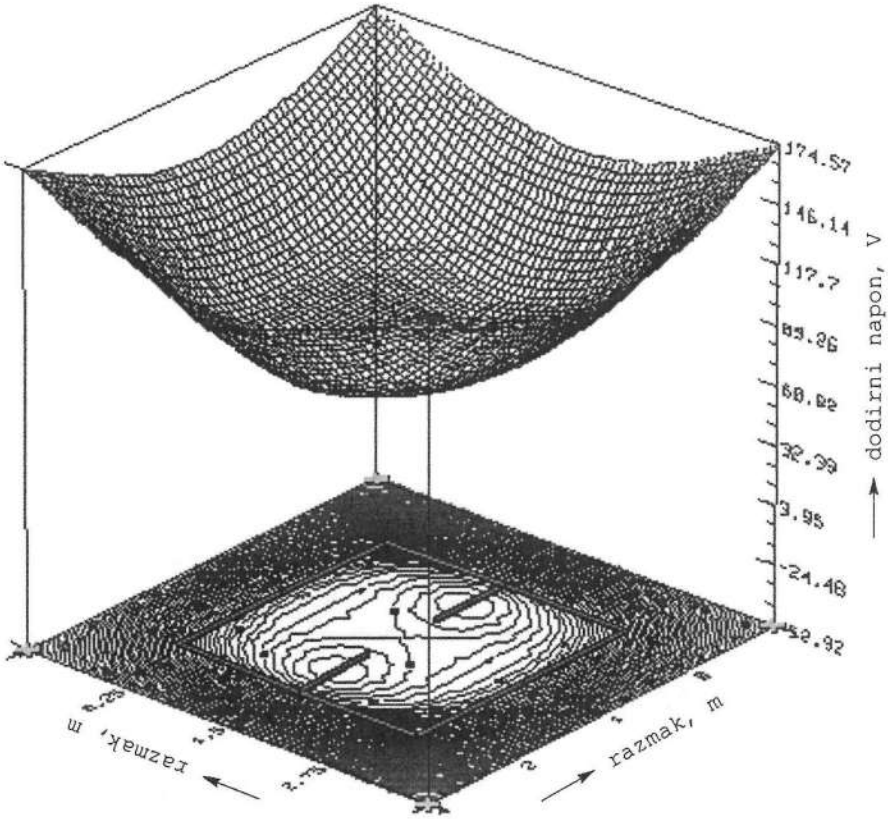
Sl. 21.1–2. Profil potencijala na površini tla.

****

Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV I_z = 20 A

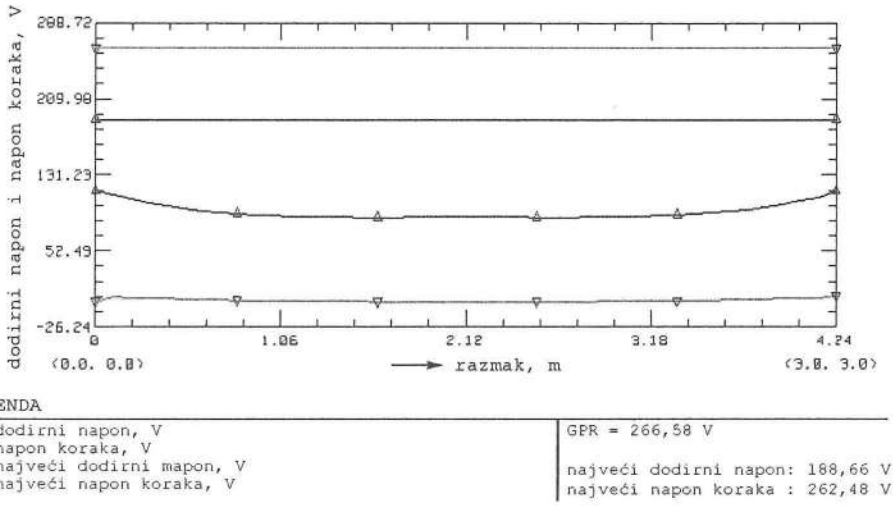
Struja uzemljivača : 20.00 A

Dubina jednoslojno tlo : 100.00 m



Sl. 21.1–3. Dodirni napon na površini tla i prostorno po koordinatama x, y, z.

```
Otpornost tla          : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača: 266.58 V

Koordinate uzemljivača
X1: 0.00 m
Y1: 0.00 m
X2: 3.00 m
Y2: 3.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.10 m

Najveći dopušteni iznos dodirnog napona: 188.66 V
Najveći dopušteni iznos napona koraka  : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.1–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.2. UZEMLJENJE STUPNE TS 10(20)/0,4 kV S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM ZA UZEMLJENU NEUTRALNU TOČKU PRI STRUJI ZEMLJOSPOJA 300 A

Prikažite razdiobu potencijala za iste podatke kao u primjeru 21.1., a za izvedbu uzemljenja prema slici 21.2–1 i za ostale podatke:

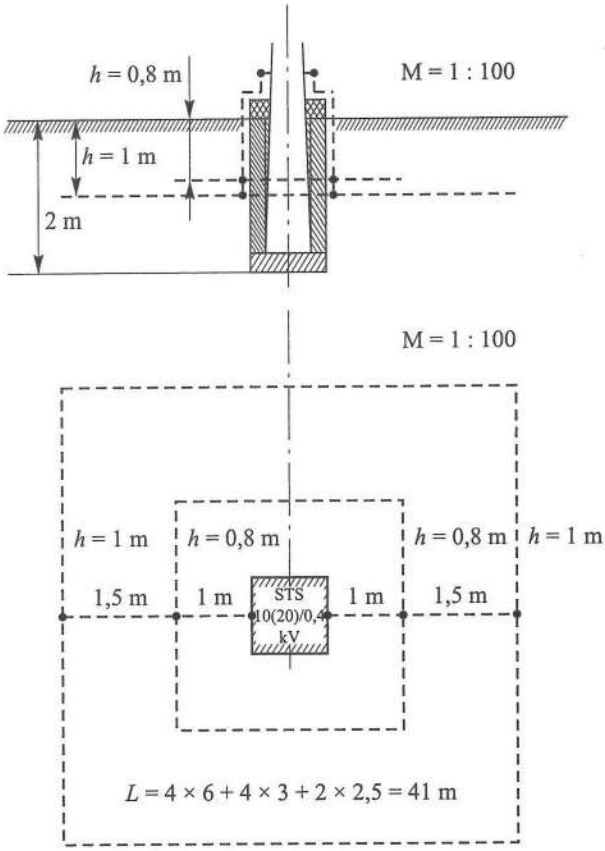
- ukupna duljina trakastog dvokonturnog uzemljivača (ne računajući okomite spojne vodove) $L = 4 \times 6 + 4 \times 3 + 2 \times 2{,}5 = 41$ m
- dubina ukopa prvog prstenastog uzemljivača $h = 0{,}8$ m, a drugog prstenastog uzemljivača $h = 1$ m
- vodoravna udaljenost drugog prstena od prvog 1,5 m
- otpornost tla $\rho_z = 100\ \Omega$m
- zemljospojna zaštita podešena je na vrijeme $\leq 0{,}5$ s
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A.

```
REZULTATI PRORAČUNA
=================================================================

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element  X1  Y1  Z1  X2  Y2  Z2  Duljina,m  Polumjer,m  Struja,A
-----------------------------------------------------------------
0001     0.0 0.0 1.0 6.0 0.0 1.0    6.00      0.0057      53.8111
```

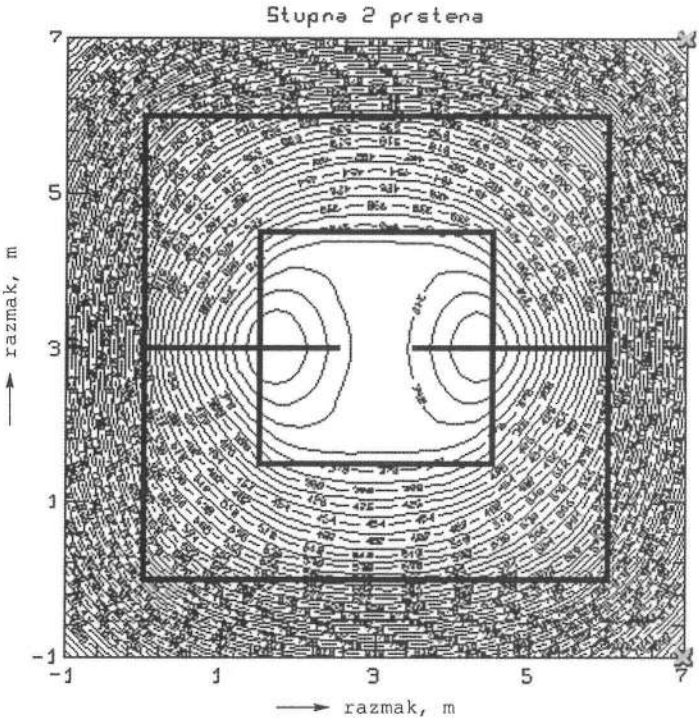
Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0002	6.0	0.0	1.0	6.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	51.6238
0003	6.0	6.0	1.0	0.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	53.8111
0004	0.0	6.0	1.0	0.0	0.0	1.0	6.00	0.0057	51.5622
0005	1.5	1.5	0.8	4.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	17.4128
0006	4.5	1.5	0.8	4.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	14.6152
0007	4.5	4.5	0.8	1.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	17.4128
0008	1.5	4.5	0.8	1.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	14.7438
0009	6.0	3.0	1.0	4.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	7.3230
0010	3.5	3.0	1.0	4.5	3.0	0.8	1.02	0.0057	4.9517
0011	0.0	3.0	1.0	1.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	7.3679
0012	1.5	3.0	1.0	2.5	3.0	0.8	1.02	0.0057	5.1590

UKUPNA DULJINA VODIČA : 41.07 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 2058.16 V
OTPOR UZEMLJIVAČA : 6.8652 Ω

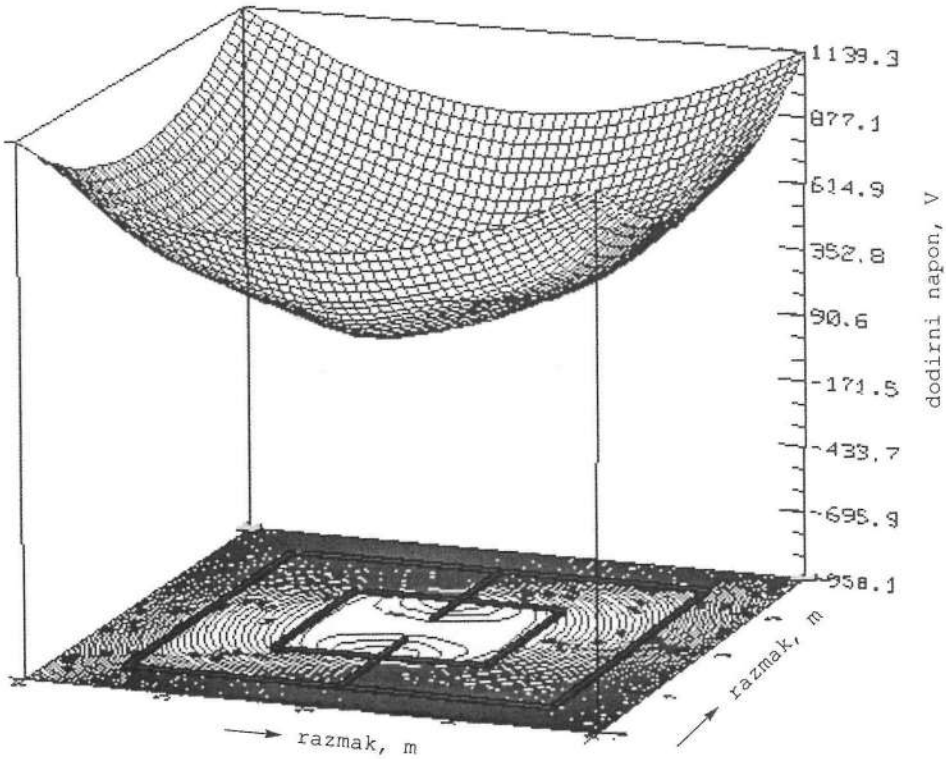


Sl. 21.2–1. Nacrt uzemljivača stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem.

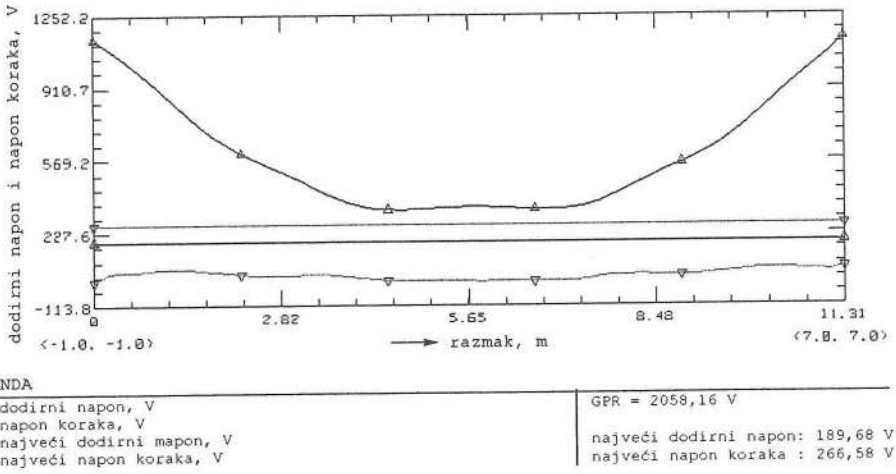


Sl. 21.2–2. Profil potencijala na površini tla.

```
*****************************************************************
Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV Iz = 300 A

Struja uzemljivača          : 300.00 A
Dubina jednoslojno tlo      : 100.00 m
Otpornost tla               : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 2058.16 V

Koordinate uzemljivača
X1: 0.00 m
Y1: 0.00 m
X2: 6.00 m
Y2: 6.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni iznos dodirnog napona: 188.66 V
Najveći dopušteni iznos napona koraka  : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.2–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.

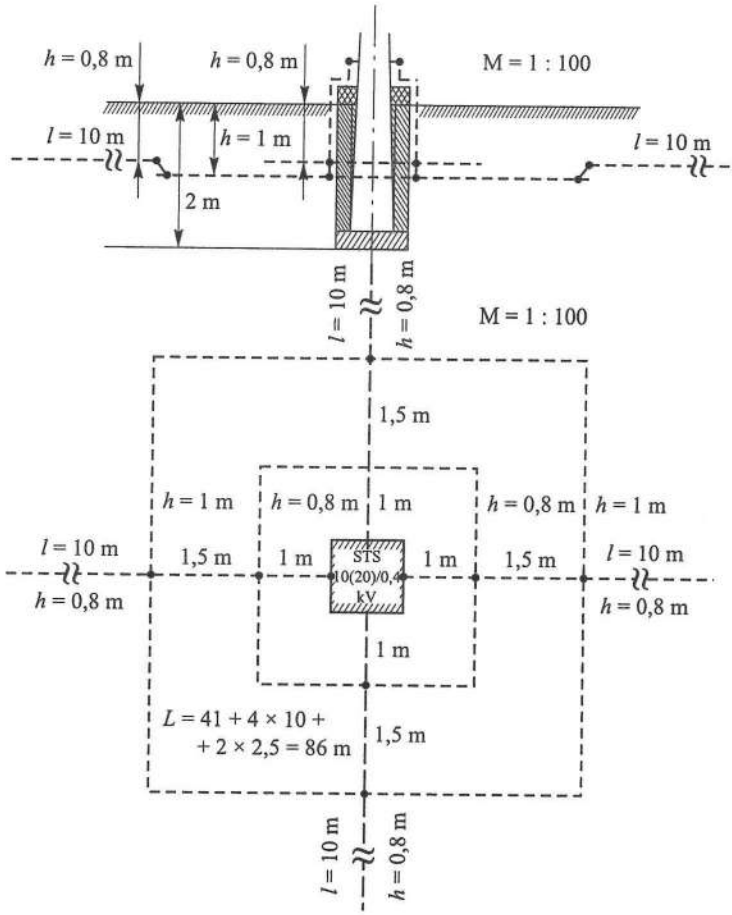


Sl. 21.2–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.3. UZEMLJENJE STUPNE TS 10(20)/0,4 KV S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM I S ČETIRI ZRAKASTA UZEMLJIVAČA, ZA STRUJU ZEMLJOSPOJA 300 A

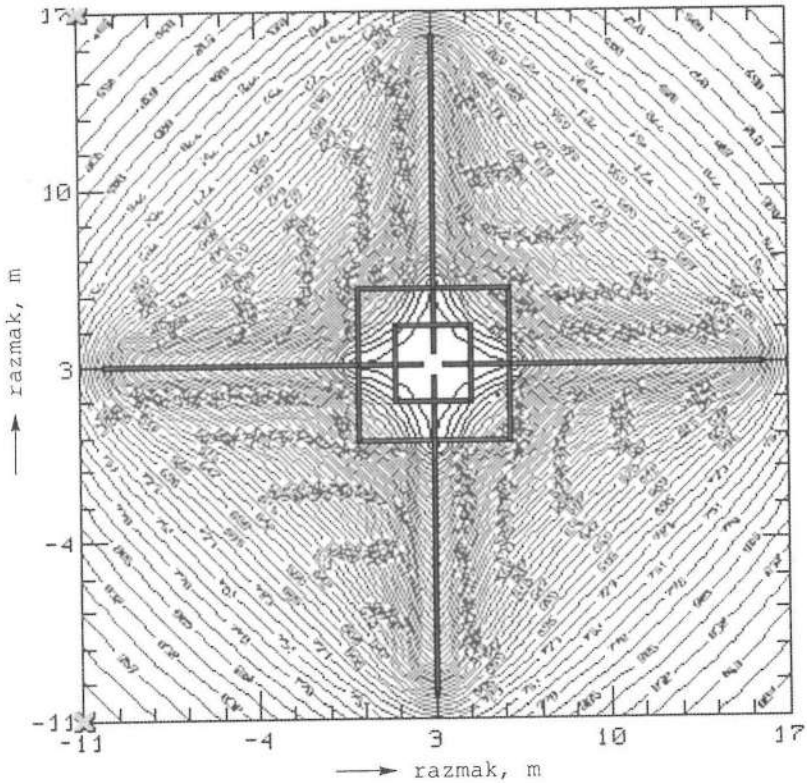
Izračunajte otpor združenog uzemljivača i prikažite razdiobu potencijala za izvedbu uzemljenja prema slici 21.3–1 sa sljedećim podacima:

- struja zemljospoja $I_z = 300$ A
- $\rho_z = 100\ \Omega$m
- željezna pocinčana traka 25 mm × 4 mm
- četiri zrakasta uzemljivača duljine po 10 m na dubini ukopa od 0,8 m
- ukupna duljina trakastog uzemljivača je 86 m
- zemljospojna zaštita namještena je na vrijeme ≤ 0,5 s, ostali podaci prema slici 21.3–1.



Sl. 21.3–1. Nacrt i tlocrt uzemljenja stupne TS 10(20)/0,4 kV s podacima za izračun otpora združenog uzemljivača.

REZULTATI PRORAČUNA



Sl. 21.3–2. Profil potencijala na površini tla.

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

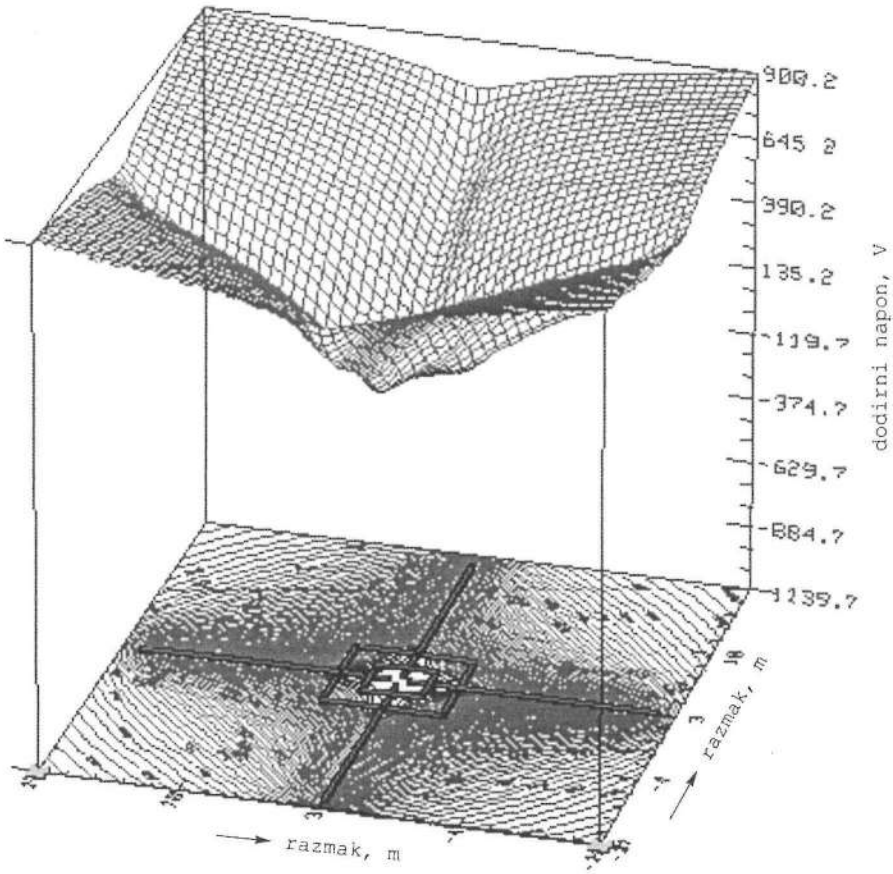
Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	6.0	0.0	1.0	6.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	17.6116
0002	6.0	6.0	1.0	0.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	16.3098
0003	0.0	6.0	1.0	0.0	0.0	1.0	6.00	0.0057	17.7152
0004	3.0	0.0	1.0	3.0	1.5	0.8	1.51	0.0057	2.5564
0005	3.0	1.5	0.8	3.0	2.5	0.8	1.00	0.0057	1.5840
0006	3.0	0.0	0.8	3.0	1.5	0.8	1.50	0.0057	2.2339
0007	3.0	6.0	1.0	3.0	4.5	0.8	1.51	0.0057	1.3641
0008	3.0	4.5	0.8	3.0	3.5	0.8	1.00	0.0057	1.4829
0009	3.0	4.5	0.8	3.0	6.0	0.8	1.50	0.0057	1.3078
0010	3.0	16.0	0.8	3.0	6.0	0.8	10.00	0.0057	51.2079
0011	0.0	3.0	1.0	1.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	1.4098
0012	1.5	3.0	0.8	2.5	3.0	0.8	1.00	0.0057	1.5272
0013	1.5	3.0	0.8	0.0	3.0	0.8	1.50	0.0057	1.3617
0014	0.0	3.0	0.8	-10.0	3.0	0.8	10.00	0.0057	51.6014

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0015	6.0	3.0	0.8	16.0	3.0	0.8	10.00	0.0057	51.6395
0016	6.0	3.0	1.0	4.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	1.9309
0017	4.5	3.0	0.8	3.5	3.0	0.8	1.00	0.0057	1.5114
0018	6.0	3.0	0.8	4.5	3.0	0.8	1.50	0.0057	1.1390
0019	3.0	0.0	0.8	3.0	-10.0	0.8	10.00	0.0057	53.7533
0020	1.5	1.5	0.8	4.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	5.7343
0021	1.5	4.5	0.8	4.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	4.7494
0022	1.5	1.5	0.8	1.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	5.1123
0023	4.5	4.5	0.8	4.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	5.0401

UKUPNA DULJINA VODIČA : 86.05 m

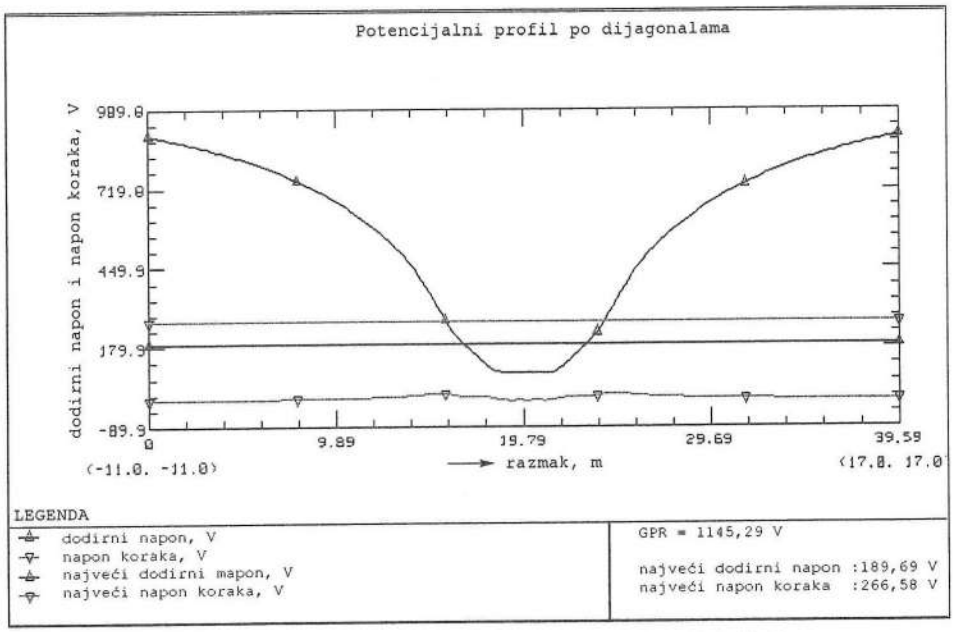
POTENCIJAL UZEMLJIVAČA (GPR) : 1145.29 V

OTPOR UZEMLJIVAČA : 3.819 Ω



Sl. 21.3–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu *x*, *y*, *z*.

```
*****************************************************************
Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV Iz = 300 A

Struja uzemljivača     : 300.00 A
Dubina jednoslojno tlo : 100.00 m
Otpornost tla          : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača : 1145.29 V

Koordinate uzemljivača
X1: -10.00 m
Y1: -10.00 m
X2:  16.00 m
Y2:  16.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni iznos dodirnog napona: 188.66 V
Najveći dopušteni iznos napona koraka  : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```

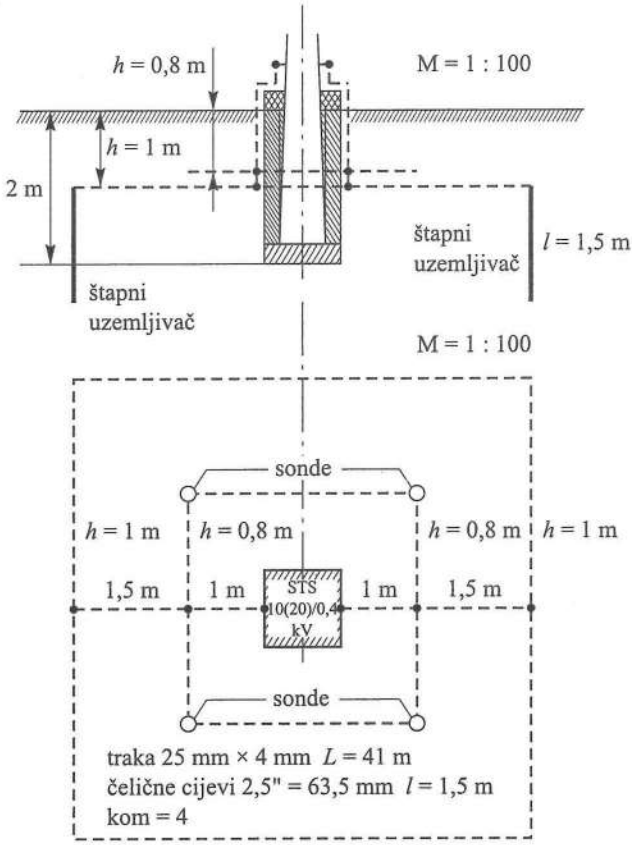


Sl. 21.3–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonalama na tlu.

21.4. UZEMLJENJE STUPNE TS 10(20)/0,4 kV S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM I S ČETIRI ŠTAPNA UZEMLJIVAČA, ZA STRUJU ZEMLJOSPOJA 300 A

Izračunajte otpor združenog uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za izvedbu uzemljivača prema slici 21.4–1 sa sljedećim podacima:

- otpornost donjeg sloja tla $\rho_z = 30\ \Omega\text{m}$
- otpornost gornjeg sloja tla debljine $h = 1$ m, $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A,
- željezna pocinčana traka 25 mm × 4 mm ukupne duljine $l = 41$ m
- štapni cijevni uzemljivači vanjskog promjera 2,5″ (promjera 63,5 mm), duljine 1,5 m, kom. 4
- zemljospojna zaštita namještena je na vrijeme ≤ 0,5 s.



Sl. 21.4–1. Nacrt i tlocrt uzemljenja stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim trakastim uzemljivačem i četiri štapna uzemljivača (sonde) za struju zemljospoja 300 A.

REZULTATI PRORAČUNA

==========

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	1.0	6.0	0.0	1.0	6.00	0.0057	45.2009
0002	6.0	0.0	1.0	6.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	44.3237
0003	6.0	6.0	1.0	0.0	6.0	1.0	6.00	0.0057	45.2009
0004	0.0	6.0	1.0	0.0	0.0	1.0	6.00	0.0057	44.3243
0005	1.5	1.5	0.8	4.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	5.4778
0006	4.5	1.5	0.8	4.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	4.7139
0007	4.5	4.5	0.8	1.5	4.5	0.8	3.00	0.0057	5.4778
0008	1.5	4.5	0.8	1.5	1.5	0.8	3.00	0.0057	4.7137
0009	6.0	3.0	1.0	4.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	3.2011
0010	3.5	3.0	0.8	4.5	3.0	0.8	1.00	0.0057	1.8899
0011	0.0	3.0	1.0	1.5	3.0	0.8	1.51	0.0057	3.1985
0012	1.5	3.0	0.8	2.5	3.0	0.8	1.00	0.0057	1.8924

Ukupna duljina trake: 41.02 m

0013	1.5	1.5	0.8	1.5	1.5	1.0	0.20	0.0318	0.2364
0014	1.5	1.5	1.0	1.5	1.5	2.3	1.30	0.0318	22.3476
0015	1.5	4.5	0.8	1.5	4.5	1.0	0.20	0.0318	0.2362
0016	1.5	4.5	1.0	1.5	4.5	2.3	1.30	0.0318	22.3477
0017	4.5	1.5	0.8	4.5	1.5	1.0	0.20	0.0318	0.2362
0018	4.5	1.5	1.0	4.5	1.5	2.3	1.30	0.0318	22.3477
0019	4.5	4.5	0.8	4.5	4.5	1.0	0.20	0.0318	0.2361
0020	4.5	4.5	1.0	4.5	4.5	2.3	1.30	0.0318	22.3478

Ukupna duljina šipki: 6.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA : 494.52 V
OTPOR UZEMLJIVAČA : 1.6484 Ω

****

Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV I_z = 300 A

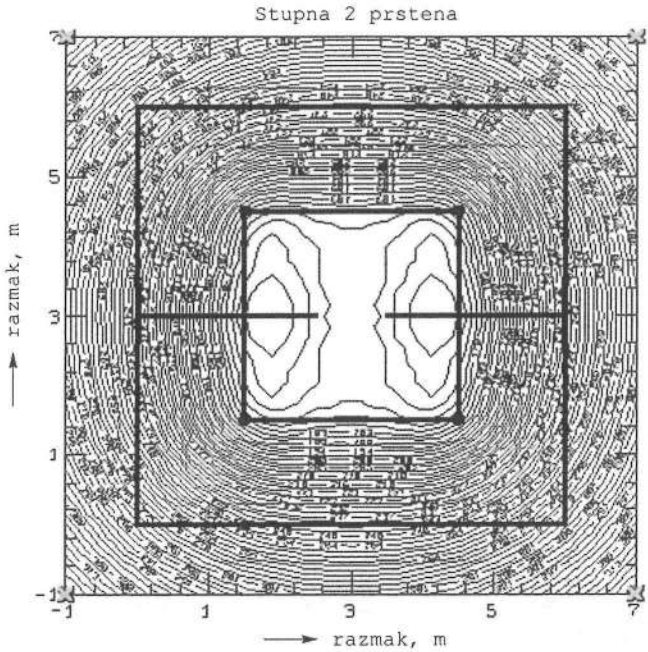
Struja uzemljivača : 300.00 A
Potencijal uzemljivača (GPR) : 1946.06 V

Koordinate uzemljivača
X1: 0.00 m
Y1: 0.00 m
X2: 6.00 m
Y2: 6.00 m

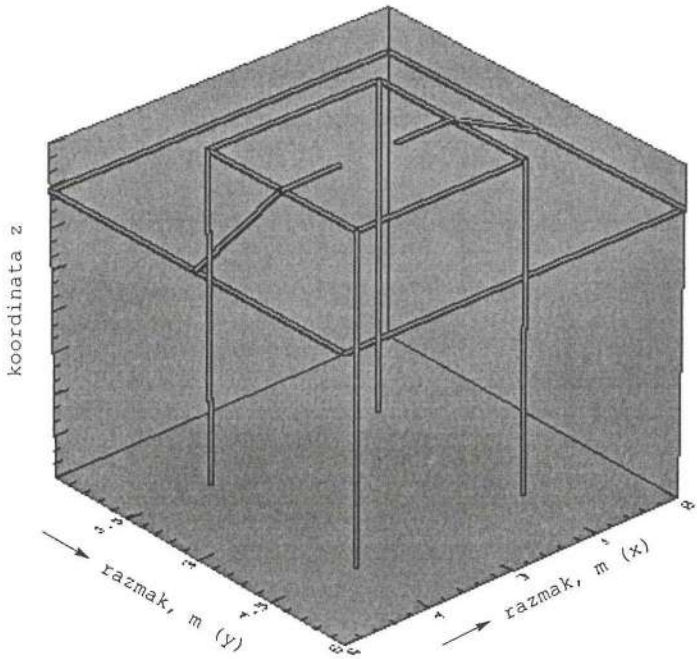
Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 262.48 V

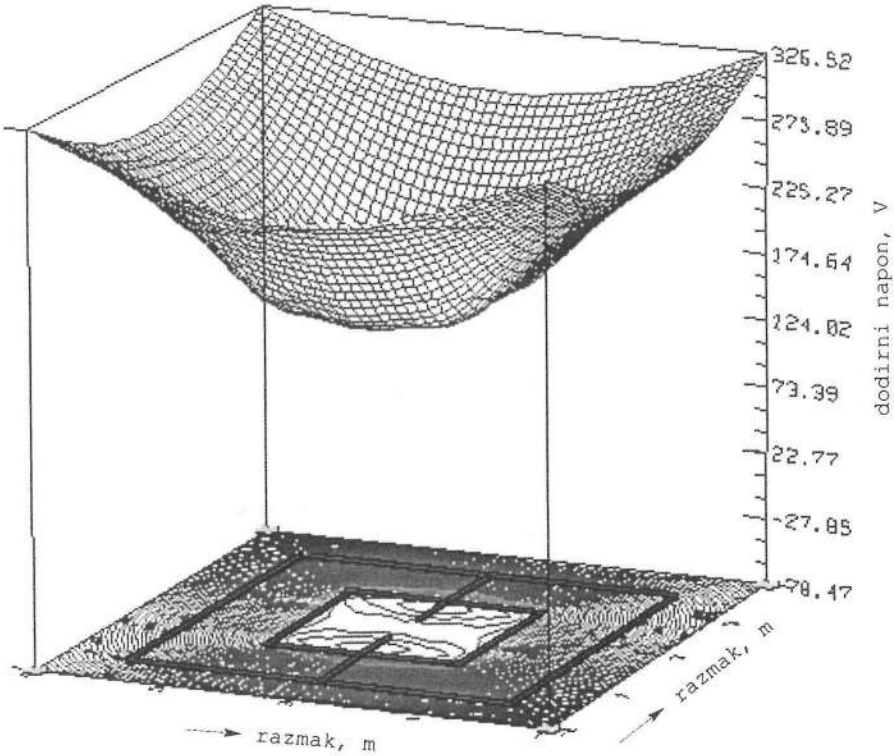
Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj : 0.00 m
Gornji sloj : 100.00 Ωm
Donji sloj : 30.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00



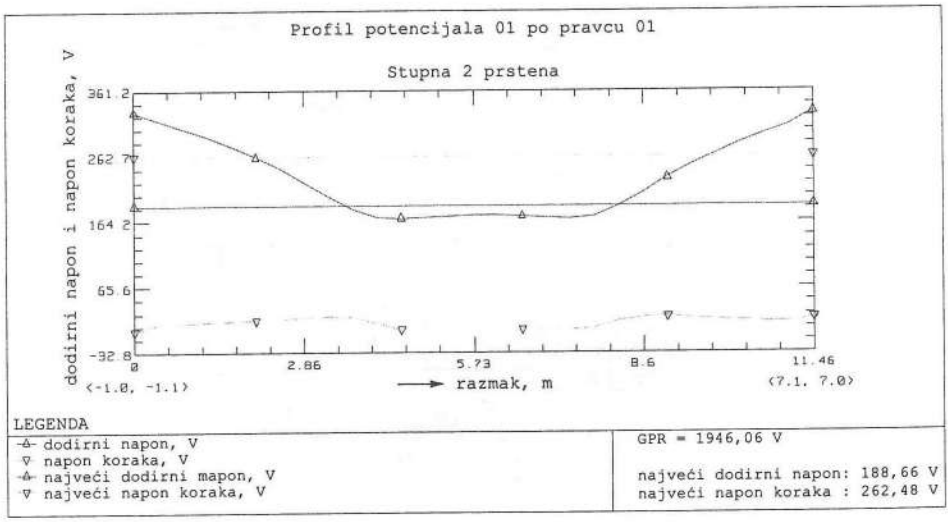
Sl. 21.4–2. Profil potencijala na površini tla.



Sl. 21.4–3. Profil uzemljivača.



Sl. 21.4–4. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.

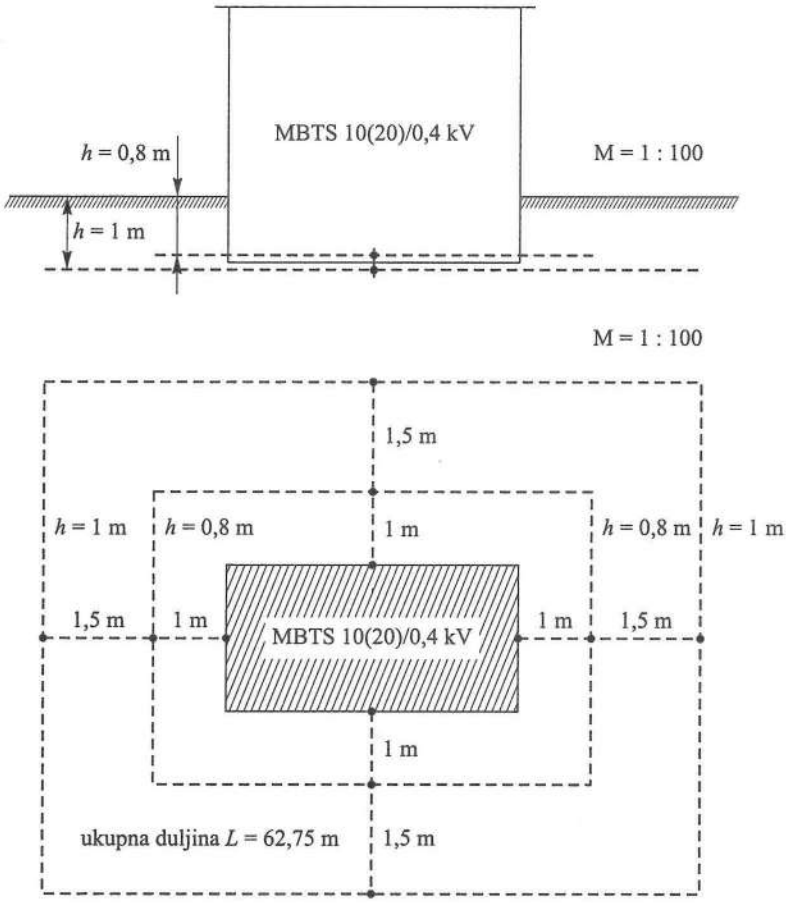


Sl. 21.4–5. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.5. UZEMLJENJE MONTAŽNE BETONSKE TRANSFORMATORSKE STANICE (MBTS) 10(20)/0,4 kV ZA STRUJU ZEMLJOSPOJA $I_z = 300$ A S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM

Izračunajte otpor združenog uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za izvedbu dvokonturnog uzemljivača MBTS 10(20)/0,4 kV za sljedeće podatke:

- $\rho_z = 100\ \Omega$m
- uzemljivač je od željezne pocinčane trake 25 mm × 4 mm položen na dubini $h = 0{,}8$ m i $h = 1$ m, ukupne duljine $L = 62{,}75$ m i ostalim podacima prema slici 21.5–1
- zemljospojna zaštita namještena je na vrijeme $\leq 0{,}5$ s
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A.



Sl. 21.5–1.

REZULTATI PRORAČUNA

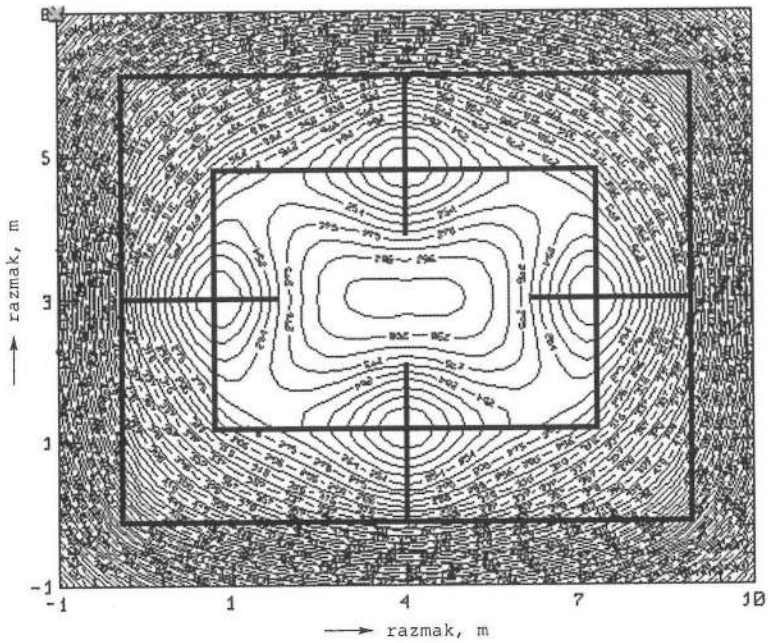
DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	1.0	9.1	0.0	1.0	9.10	0.0057	53.2206
0002	9.1	0.0	1.0	9.1	7.1	1.0	7.10	0.0057	42.9260
0003	9.1	7.1	1.0	0.0	7.1	1.0	9.10	0.0057	53.2796
0004	0.0	7.0	1.0	0.0	0.0	1.0	7.00	0.0057	42.2652
0005	1.5	1.5	0.8	7.6	1.5	0.8	6.10	0.0057	22.7671
0006	7.6	1.5	0.8	7.6	5.6	0.8	4.10	0.0057	14.9441
0007	7.6	5.6	0.8	1.5	5.6	0.8	6.10	0.0057	22.8035
0008	1.5	5.6	0.8	1.5	1.5	0.8	4.10	0.0057	14.9976
0009	4.6	0.0	1.0	4.6	1.5	0.8	1.51	0.0057	4.6638
0010	4.6	7.1	1.0	4.6	5.6	0.8	1.51	0.0057	4.6678
0011	0.0	3.5	1.0	1.5	3.5	0.8	1.51	0.0057	4.9820
0012	4.6	1.5	0.8	4.6	2.5	0.8	1.00	0.0057	3.3103
0013	1.5	3.5	0.8	2.5	3.5	0.8	1.00	0.0057	3.3754
0014	4.6	5.6	0.8	4.6	4.6	0.8	1.00	0.0057	3.3112
0015	9.1	3.5	1.0	7.6	3.5	0.8	1.51	0.0057	4.9595
0016	7.6	3.5	0.8	6.6	3.5	0.8	1.00	0.0057	3.3694

UKUPNA DULJINA VODIČA: 62.75 m

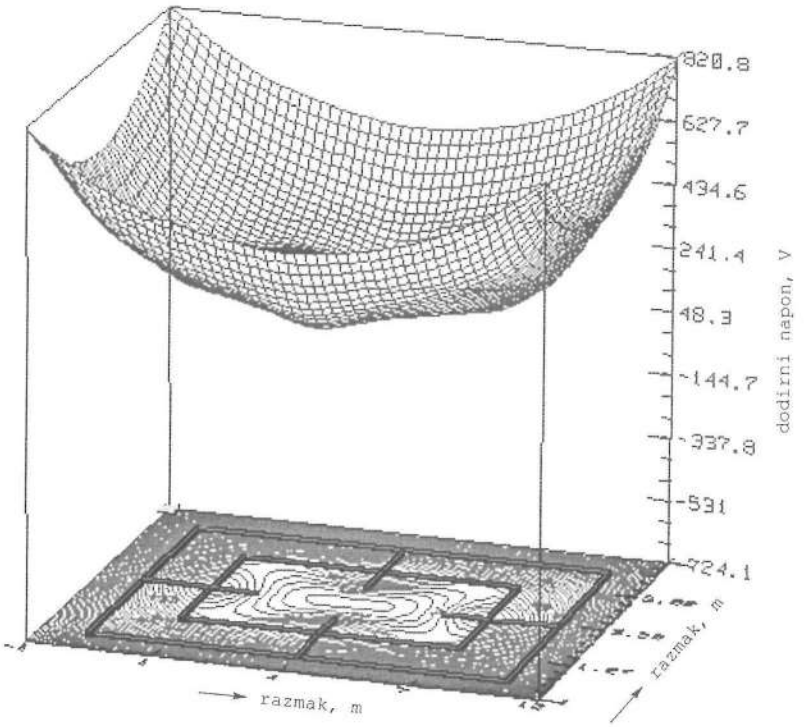
POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 1569.85 V

OTPOR UZEMLJIVAČA : 5.2328 Ω

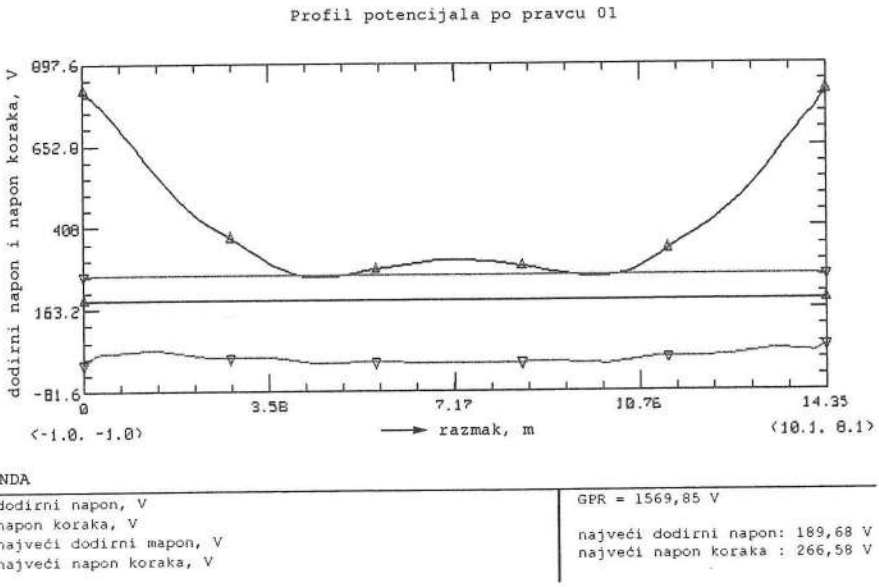


Sl. 21.5–2. Profil potencijala na površini tla.

```
*****************************************************************
Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV Iz = 300 A

Struja uzemljivača            : 300.00 A
Dubina jednoslojno tlo        : 100.00 m
Otpornost tla                 : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 1569.85 V

Koordinate uzemljivača
X1: 0.00 m
Y1: 0.00 m
X2: 9.10 m
Y2: 7.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.5–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu *x*, *y*, *z*.



Sl. 21.5–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.6. UZEMLJENJE MONTAŽNE BETONSKE TRANSFORMATORSKE STANICE (MBTS) 10(20)/0,4 kV ZA STRUJU ZEMLJOSPOJA $I_z = 300$ A S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM I S ČETIRI ZRAKASTA UZEMLJIVAČA

Izračunajte otpor združenog uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za izvedbu uzemljivača prema slici 21.6–1 sa sljedećim podacima:

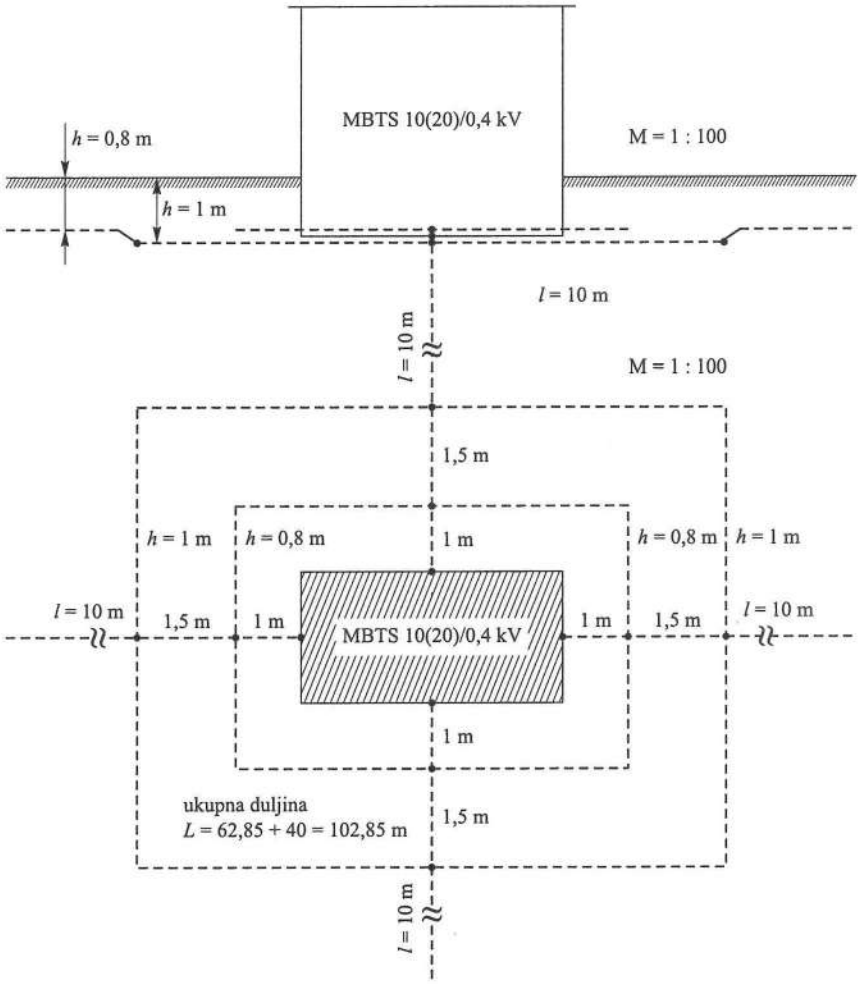
- $\rho_z = 100\ \Omega$m
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A
- trakasti uzemljivač od željezne pocinčane trake 25 mm × 4 mm ukupne duljine $L = 102{,}85$ m, raspoređen i položen kako je to navedeno na slici 21.6–1
- zemljospojna zaštita namještena je na vrijeme ≤ 0,5 s.

REZULTATI PRORAČUNA

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	1.0	9.1	0.0	1.0	9.10	0.0057	22.6557
0002	9.1	0.0	1.0	9.1	7.1	1.0	7.10	0.0057	17.7436

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0003	9.1	7.1	1.0	0.0	7.1	1.0	9.10	0.0057	22.6604
0004	0.0	7.0	1.0	0.0	0.0	1.0	7.00	0.0057	17.4374
0005	1.5	1.5	0.8	7.6	1.5	0.8	6.10	0.0057	10.2118
0006	7.6	1.5	0.8	7.6	5.6	0.8	4.10	0.0057	6.5999
0007	7.6	5.6	0.8	1.5	5.6	0.8	6.10	0.0057	10.2427
0008	1.5	5.6	0.8	1.5	1.5	0.8	4.10	0.0057	6.6625
0009	4.6	0.0	1.0	4.6	1.5	0.8	1.51	0.0057	1.4624
0010	4.6	0.0	1.0	4.6	0.0	0.8	0.20	0.0057	0.0000
0011	0.0	3.5	0.8	0.0	3.5	1.0	0.20	0.0057	0.0000
0012	0.0	3.5	0.8	-10.0	3.5	0.8	10.00	0.0057	44.0137
0013	9.1	3.5	0.8	19.1	3.5	0.8	10.00	0.0057	43.9719

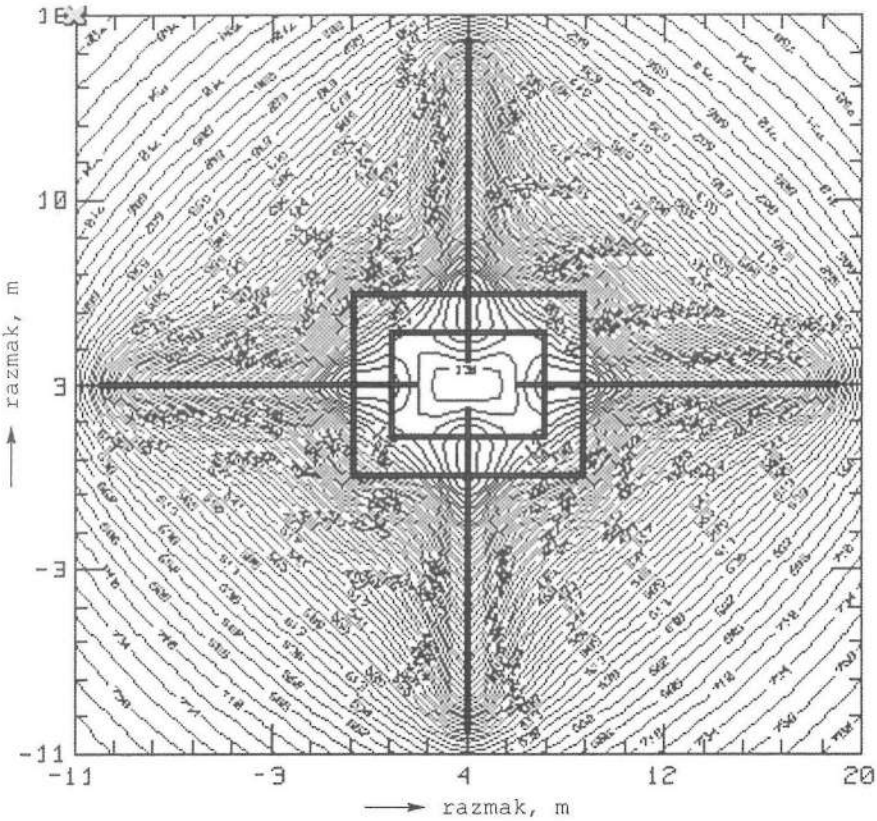


Sl. 21.6–1.

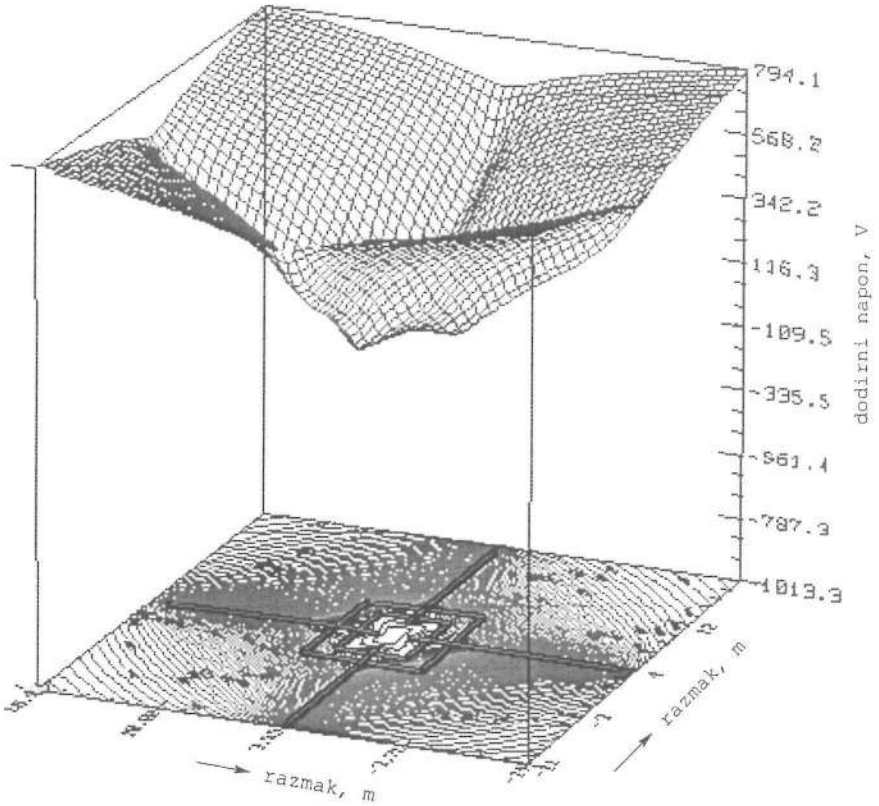
Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0014	4.6	7.1	0.8	4.6	7.1	1.0	0.20	0.0057	0.0000
0015	4.6	5.6	0.8	4.6	7.1	1.0	1.51	0.0057	1.4851
0016	4.6	7.1	0.8	4.6	17.1	0.8	10.00	0.0057	42.6472
0017	0.0	3.5	1.0	1.5	3.5	0.8	1.51	0.0057	2.0316
0018	4.6	0.0	0.8	4.6	-10.0	0.8	10.00	0.0057	42.6366
0019	4.6	1.4	0.8	4.6	2.5	0.8	1.10	0.0057	1.5382
0020	1.5	3.5	0.8	2.5	3.5	0.8	1.00	0.0057	1.5309
0021	4.6	5.6	0.8	4.6	4.5	0.8	1.10	0.0057	1.6939
0022	9.1	3.5	1.0	7.6	3.5	0.8	1.51	0.0057	2.0116
0023	9.1	3.5	0.8	9.1	3.5	1.0	0.20	0.0057	0.0000
0024	7.6	3.5	0.8	6.5	3.5	0.8	1.10	0.0057	1.6964

UKUPNA DULJINA VODIČA: 102.85 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 1023.17 V
OTPOR UZEMLJIVAČA : 3.4117 Ω



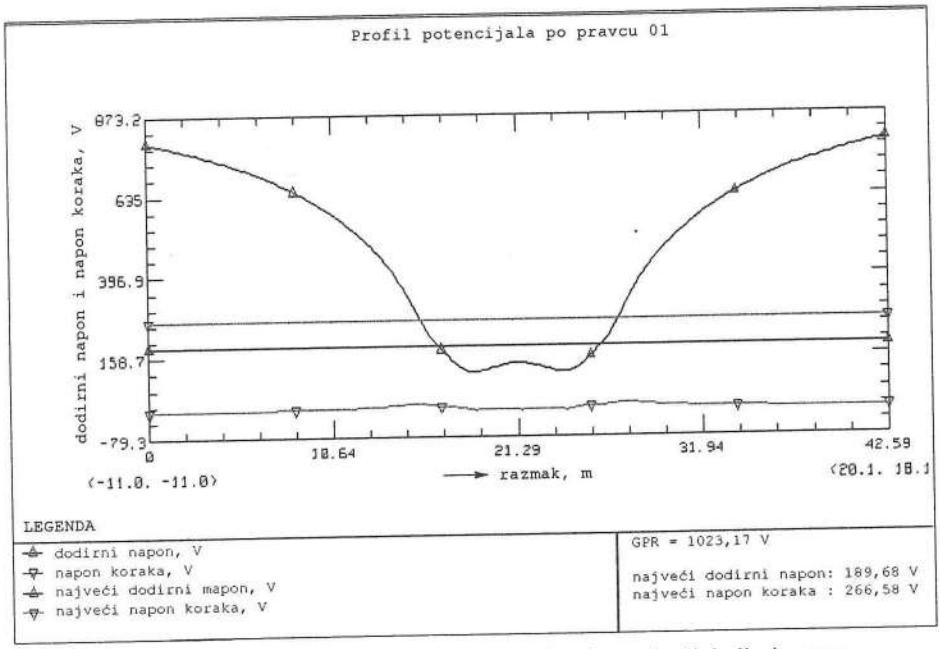
Sl. 21.6–2. Profil potencijala na površini tla.



Sl. 21.6–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu *x*, *y*, *z*.

```
*****************************************************************
Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV Iz = 300 A

Struja uzemljivača          :  300.00 A
Dubina jednoslojno tlo      :  100.00 m
Otpornos tla                :  100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 1023.17 V

Koordinate uzemljivača
X1: -10.00 m
Y1: -10.00 m
X2:  19.10 m
Y2:  17.10 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 262.48 V

Težina tijela: 50 kg
Nasuti sloj  : 0.00 m
```

```
Gornji sloj    : 100.00 Ωm
Donji sloj     : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```

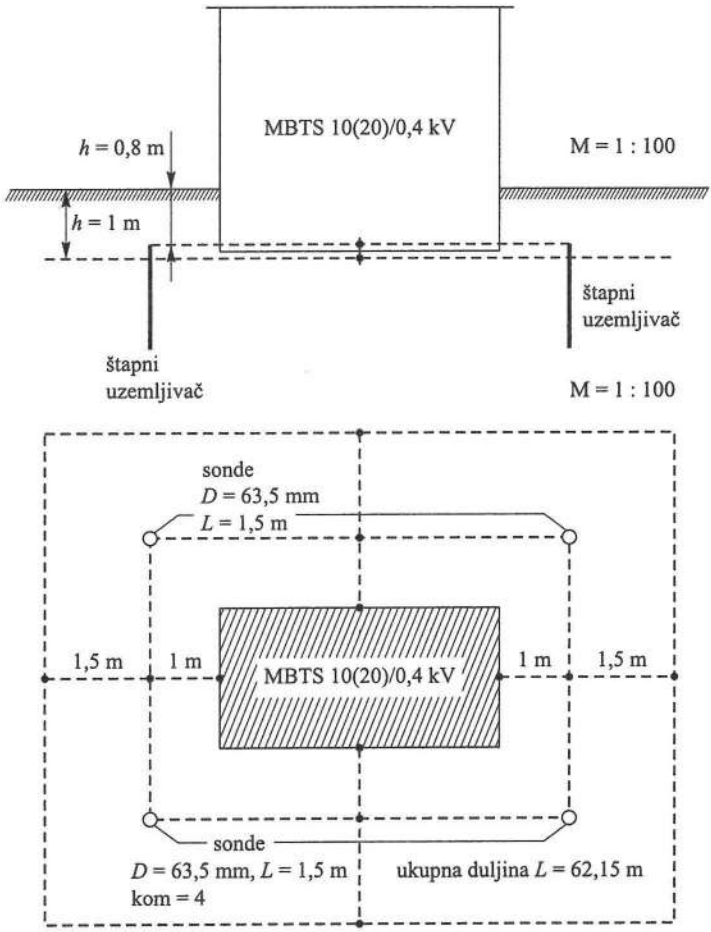


Sl. 21.6–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.7. UZEMLJENJE MONTAŽNE BETONSKE TRANSFORMATORSKE STANICE (MBTS) 10(20)/0,4 kV ZA STRUJU ZEMLJOSPOJA I_z = 300 A S DVOKONTURNIM UZEMLJIVAČEM I S ČETIRI ŠTAPNA (CIJEVNA) UZEMLJIVAČA

Izračunajte otpor združenog uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za izvedbu uzemljivača prema slici 21.7–1 sa sljedećim podacima:

- otpornost donjeg sloja ρ_z = 30 Ωm
- otpornost gornjeg sloja tla debljine h = 1 m, ρ_z = 100 Ωm
- uzemljivač je od željezne pocinčane trake 25 mm × 4 mm položen na dubini h = 0,8 m i h = 1 m, ukupne duljine L = 63,15 m s četiri štapna (cijevna) uzemljivača vanjskog promjera 63,5 mm, duljine 1,5 m
- struja zemljospoja I_z = 300 A
- zemljospojna zaštita je podešena na vrijeme ≤ 0,5 s.



Sl. 21.7–1.

REZULTATI PRORAČUNA

==========

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	1.0	9.1	0.0	1.0	9.10	0.0057	49.6427
0002	9.1	0.0	1.0	9.1	7.1	1.0	7.10	0.0057	38.8566
0003	9.1	7.1	1.0	0.0	7.1	1.0	9.10	0.0057	49.6206
0004	0.0	7.1	1.0	0.0	0.0	1.0	7.10	0.0057	38.8700
0005	1.5	1.5	0.8	7.6	1.5	0.8	6.10	0.0057	11.7762
0006	7.6	1.5	0.8	7.6	5.6	0.8	4.10	0.0057	7.0737
0007	7.6	5.6	0.8	1.5	5.6	0.8	6.10	0.0057	11.8409
0008	1.5	5.6	0.8	1.5	1.5	0.8	4.10	0.0057	7.0984

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0009	4.6	0.0	1.0	4.6	1.5	0.8	1.51	0.0057	3.1715
0010	4.6	5.6	0.8	4.6	7.1	1.0	1.51	0.0057	3.2075
0011	0.0	3.5	1.0	1.5	3.5	0.8	1.51	0.0057	3.1377
0012	4.6	1.4	0.8	4.6	2.5	0.8	1.10	0.0057	2.2017
0013	1.5	3.5	0.8	2.5	3.5	0.8	1.00	0.0057	2.0386
0014	4.6	5.6	0.8	4.6	4.5	0.8	1.10	0.0057	2.3747
0015	9.1	3.5	1.0	7.6	3.5	0.8	1.51	0.0057	3.1288
0016	7.6	3.5	0.8	6.5	3.5	0.8	1.10	0.0057	2.2574

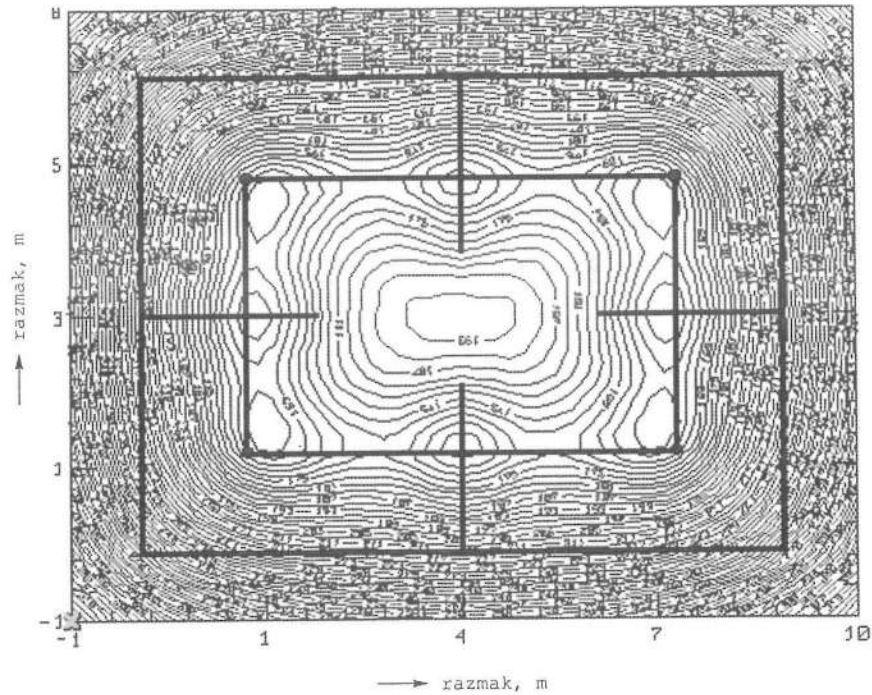
Ukupna duljina trakastog uzemljivača: 63.15 m

0017	1.5	1.5	0.8	1.5	1.5	1.0	0.20	0.0318	0.2221
0018	1.5	1.5	1.0	1.5	1.5	2.3	1.30	0.0318	15.6999
0019	7.6	1.5	0.8	7.6	1.5	1.0	0.20	0.0318	0.2219
0020	7.6	1.5	1.0	7.6	1.5	2.3	1.30	0.0318	15.6890
0021	7.6	5.6	0.8	7.6	5.6	1.0	0.20	0.0318	0.2198
0022	7.6	5.6	1.0	7.6	5.6	2.3	1.30	0.0318	15.6820
0023	1.5	5.6	0.8	1.5	5.6	1.0	0.20	0.0318	0.2200
0024	1.5	5.6	1.0	1.5	5.6	2.3	1.30	0.0318	15.6929

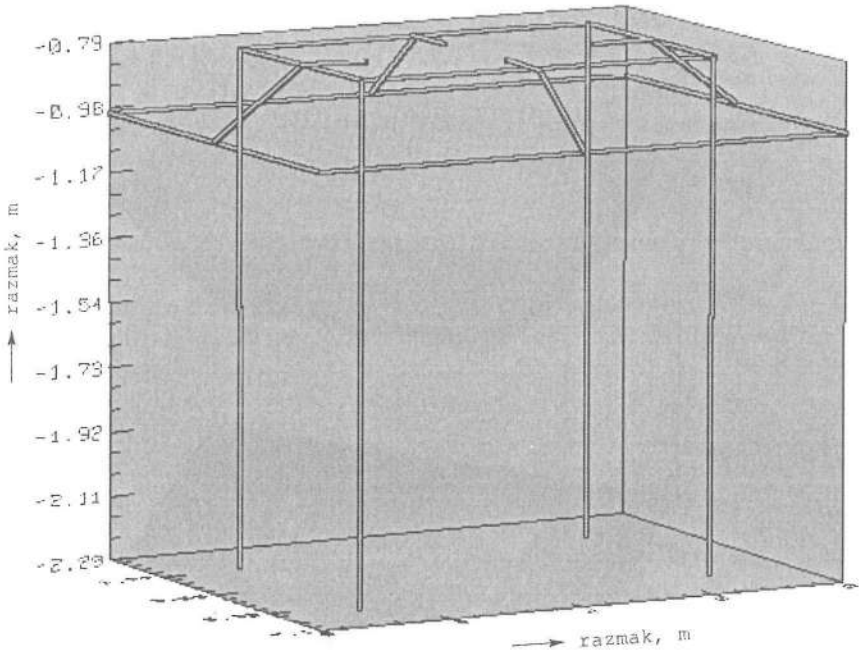
Ukupna duljina štapnog uzemljivača: 6.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 553.39 V

OTPOR UZEMLJIVAČA : 1.8446 Ω

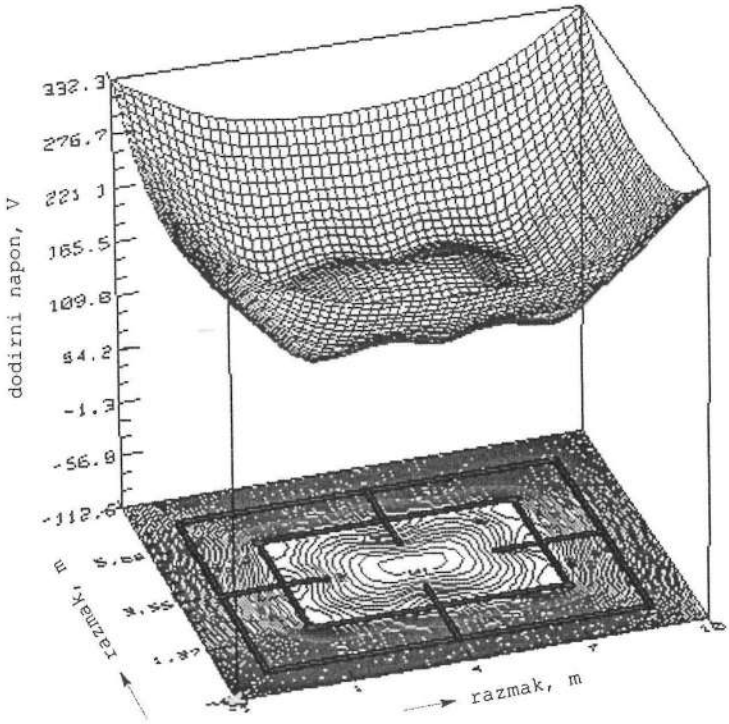


Sl. 21.7–2. Profil potencijala na površini tla.

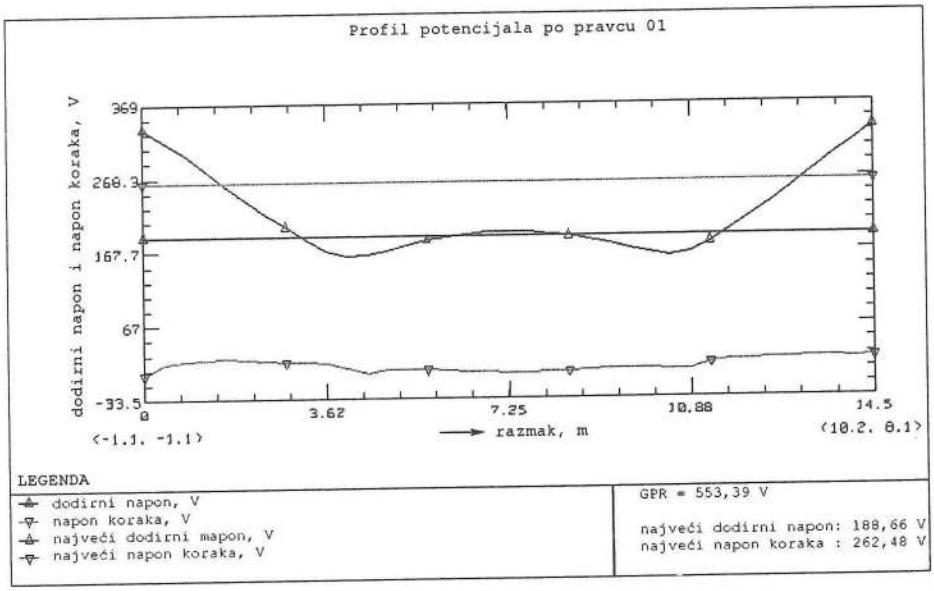


Sl. 21.7–3. Prostorni profil uzemljivača.

```
*****************************************************************
Profil potencijala TS 10(20)/0.4 kV Iz = 300 A

Struja uzemljivača            : 300.00 A
Dubina gornjeg sloja          :   1.00 m
Otpornost tla gornja          : 100.00 Ωm
Otpornost tla donja           :  30.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 553.39 V

Koordinate uzemljivača
X1: 0.00 m
Y1: 0.00 m
X2: 9.10 m
Y2: 7.10 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon    : 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka     : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.7–4. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.

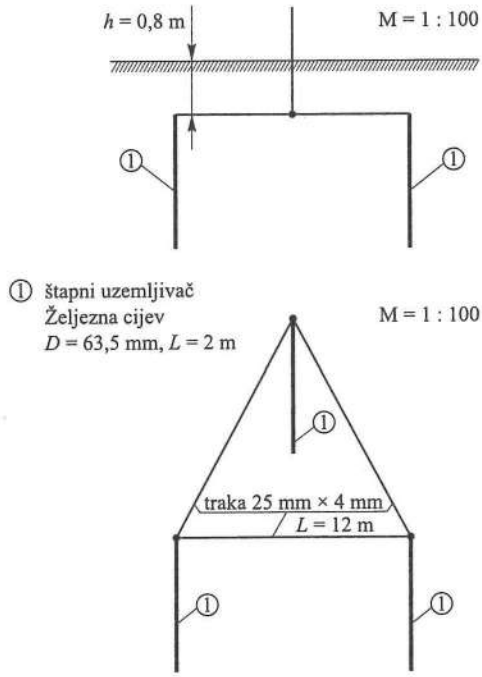


Sl. 21.7–5. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.8. TRAKASTI UZEMLJIVAČ U OBLIKU TROKUTA SA ŠTAPNIM UZEMLJIVAČIMA NA KUTOVIMA

Izračunajte otpor trokutastog trakastog s tri štapna uzemljivača prema slici 21.8–1 i prikažite razdiobu potencijala za sljedeće podatke:

- otpornost donjeg sloja $\rho_z = 30\ \Omega\text{m}$
- otpornost gornjeg sloja tla debljine $h = 1$ m, $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A
- ukupna duljina trakastog uzemljivača položenog na dubinu od 0,8 m, $L = 12$ m s tri štapna uzemljivača vanjskog promjera $D = 63{,}5$ mm, duljine $L = 2$ m
- dopušteni dodirni napon je 65 V.



Sl. 21.8–1. Nacrt trokutastog uzemljivača sa štapnim uzemljivačima na kutovima.

```
REZULTATI PRORAČUNA
=================================================================

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

Element  X1  Y1  Z1  X2  Y2  Z2  Duljina,m  Polumjer,m  Struja,A
-----------------------------------------------------------------
0001     0.0 0.0 0.7 2.0 3.5 0.7    4.00       0.0057     29.5607
0002     2.0 3.5 0.7 4.0 0.0 0.7    4.00       0.0057     29.5607
0003     4.0 0.0 0.7 0.0 0.0 0.7    4.00       0.0057     29.5907
Ukupna duljina trakastog uzemljivača: 11.99 m
```

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0004	4.0	0.0	0.7	4.0	0.0	1.0	0.30	0.0159	2.0863
0005	4.0	0.0	1.0	4.0	0.0	2.7	1.70	0.0159	68.3025
0006	2.0	3.5	0.7	2.0	3.5	1.0	0.30	0.0159	2.0860
0007	2.0	3.5	1.0	2.0	3.5	2.7	1.70	0.0159	68.2961
0008	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	1.0	0.30	0.0159	2.0863
0009	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	2.7	1.70	0.0159	68.3025

Ukupna duljina štapnog uzemljivača: 6.00 m

UKUPNA DULJINA UZEMLJIVAČA: 18.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 1281.58 V
OTPOR UZEMLJIVAČA : 4.2719 Ω

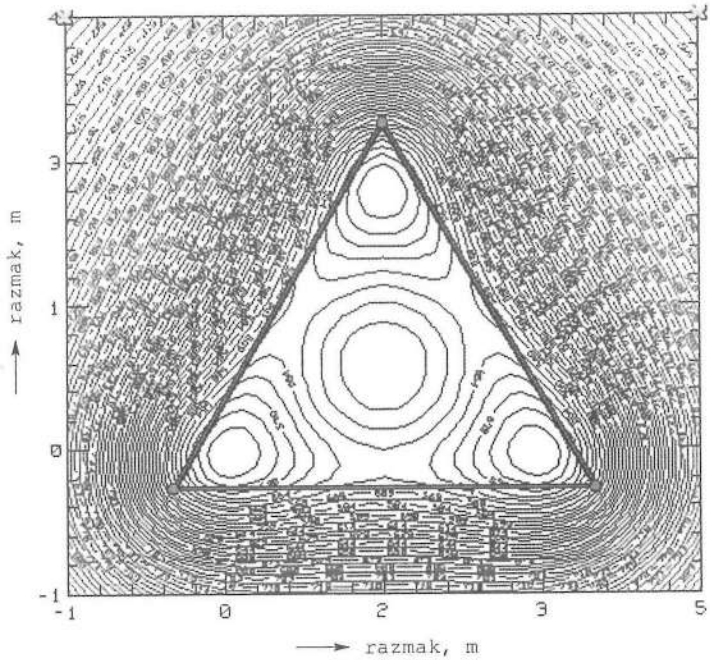
****

Struja uzemljivača : 300.00 A
Potencijal uzemljivača (GPR) : 1281.58 V

Interval izračuna na svakih: 0.50 m

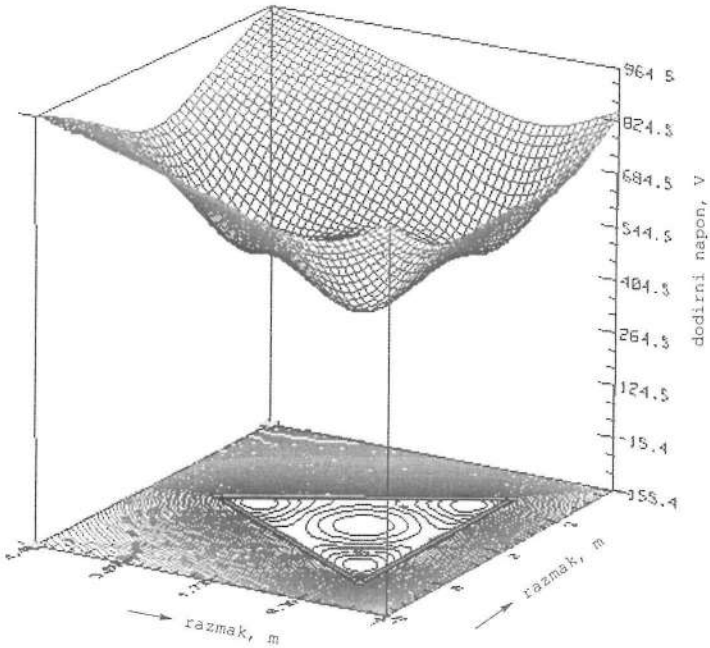
Najveći dopušteni dodirni napon: 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 262.48 V

Težina tijela: 50 kg
Nasuti sloj : 0.00 m
Debljina gornjeg sloja: 1 m

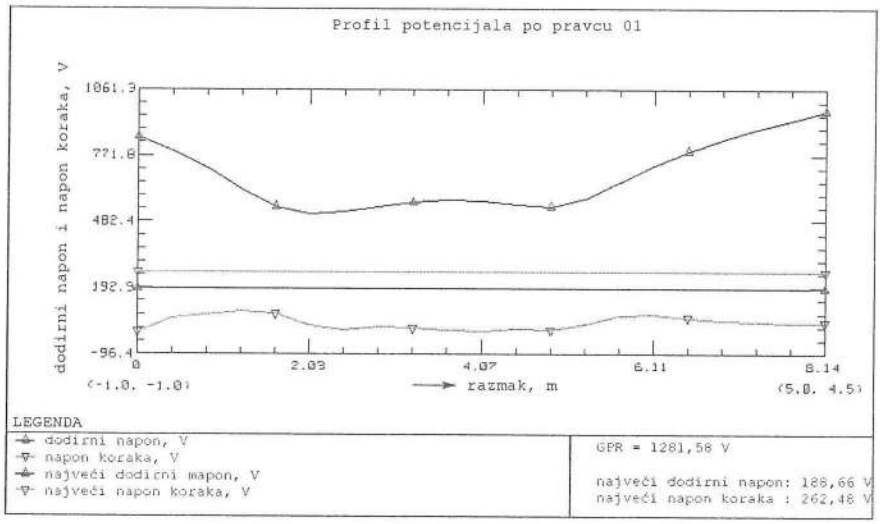


Sl. 21.8–2. Profil potencijala na površini tla.

```
Gornji sloj    : 100.00 Ωm
Donji sloj     :  30.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.8–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.



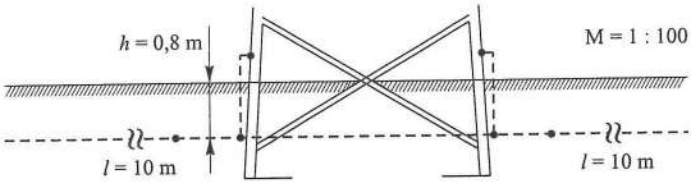
Sl. 21.8–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

21.9. UZEMLJIVAČ STUPA DALEKOVODA OD 110 kV

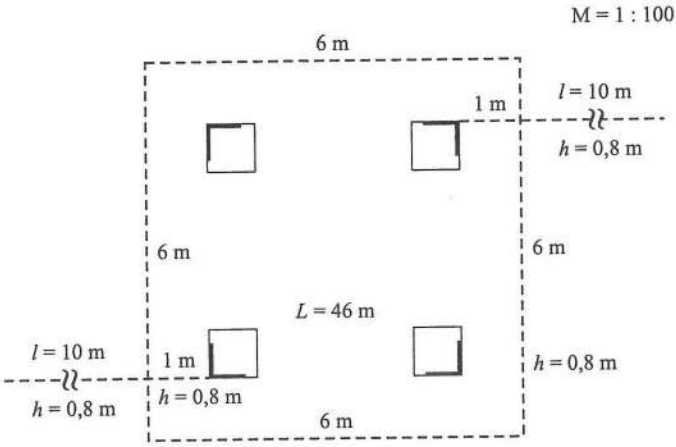
Izračunajte otpor uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za uzemljivač stupa dalekovoda prema slici 21.9–1.a) sa sljedećim podacima:

- $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$
- struja zemljospoja $I_z = 300$ A
- ukupna duljina trakastog uzemljivača 25 mm × 4 mm, $L = 46$ m koji je položen u dubinu od 0,8 m
- u vodnom polju dalekovoda ugrađena je zemljospojna zaštita koja je namještena na vrijeme ≤ 0,5 s.

Prikažite razdiobu potencijala ako je na površini tla oko temelja stupa dalekovoda nasut šljunak debljine 10 cm, $\rho_z = 2000\ \Omega\text{m}$ na udaljenosti od 2 m od temelja stupa (slika 21.9–1.b).



Sl. 21.9–1.a)



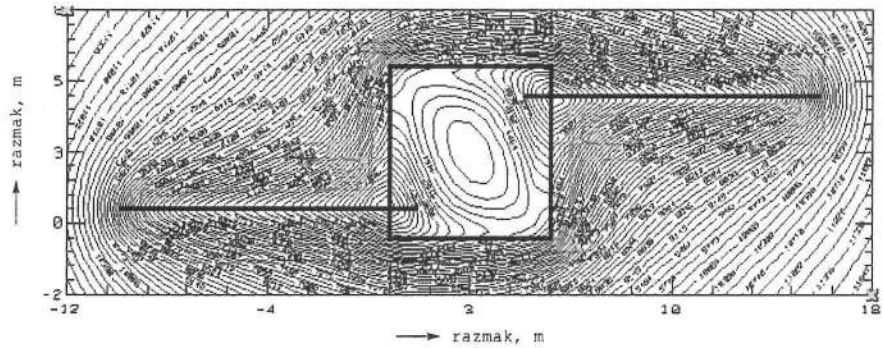
Sl. 21.9–1.b)

```
REZULTATI PRORAČUNA
=================================================================

DIMENZIJE UZEMLJIVAČA
Element  X1  Y1  Z1  X2  Y2  Z2  Duljina,m  Polumjer,m  Struja,A
-----------------------------------------------------------------
0001     0.0 1.0 0.8 1.0 1.0 0.8    1.00       0.0057     38.2950
```

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0002	0.0	0.0	0.8	0.0	1.0	0.8	1.00	0.0057	35.2149
0003	0.0	1.0	0.8	0.0	6.0	0.8	5.00	0.0057	278.6660
0004	5.0	5.0	0.8	6.0	5.0	0.8	1.00	0.0057	38.2950
0005	6.0	5.0	0.8	6.0	6.0	0.8	1.00	0.0057	35.2149
0006	6.0	0.0	0.8	6.0	5.0	0.8	5.00	0.0057	278.6660
0007	-10.0	1.0	0.8	0.0	1.0	0.8	10.00	0.0057	769.4246
0008	6.0	5.0	0.8	16.0	5.0	0.8	10.00	0.0057	769.4246
0009	0.0	6.0	0.8	6.0	6.0	0.8	6.00	0.0057	377.6458
0010	0.0	0.0	0.8	6.0	0.0	0.8	6.00	0.0057	377.6458

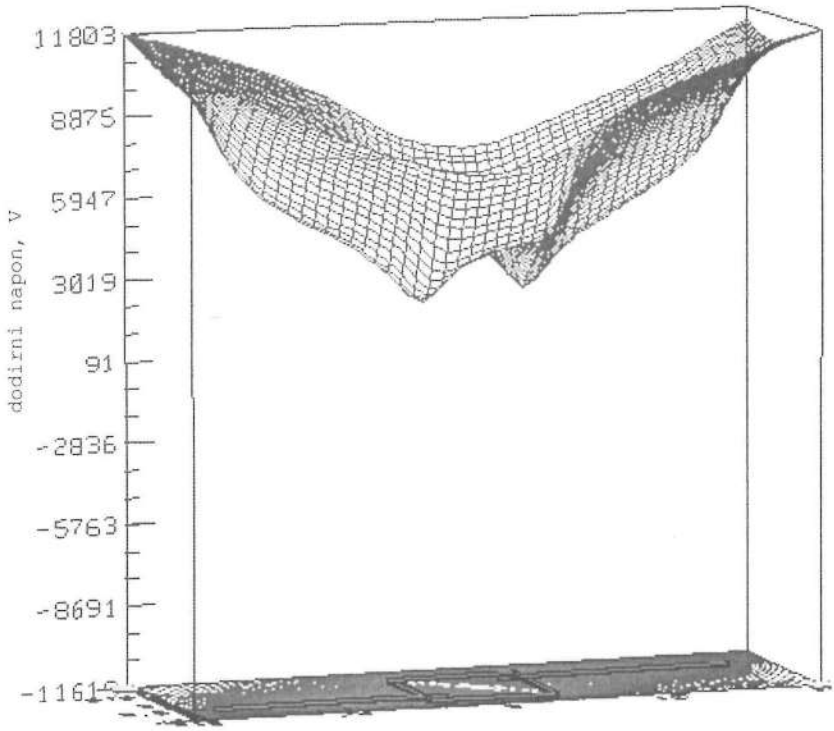
UKUPNA DULJINA UZEMLJIVAČA: 46.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA: 15074.05 V
OTPOR UZEMLJIVAČA : 5.0272 Ω

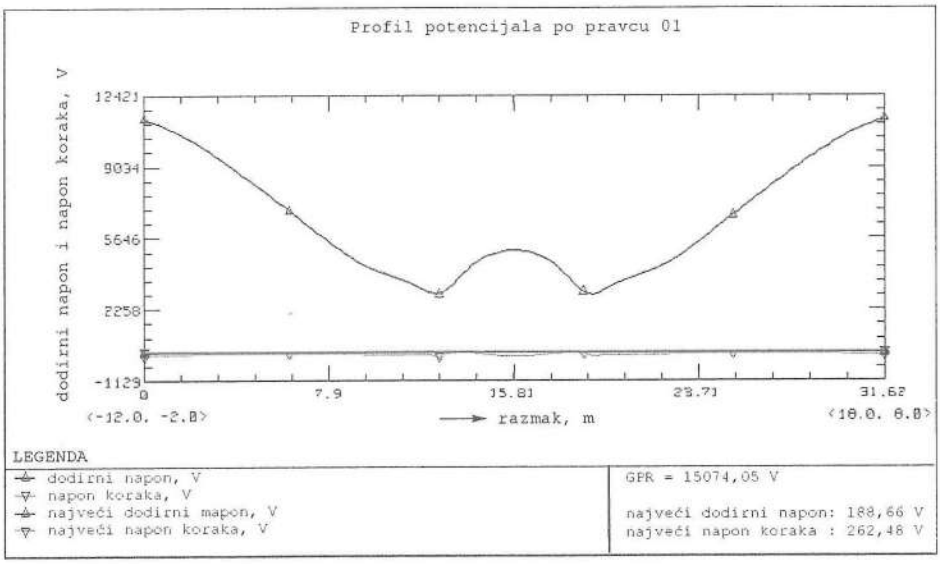


Sl. 21.9–2. Profil potencijala na površini tla.

```
*****************************************************************
Struja uzemljivača              :  3000.00 A
Dubina jednoslojnog tla         :  100.00 m
Otpornost tla                   :  100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 15074.05 V

Koordinate uzemljivača
X1: -12.00 m
Y1:   8.00 m
X2:  18.10 m
Y2:  -2.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 188.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 262.48 V

Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 1.00
```



Sl. 21.9–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.

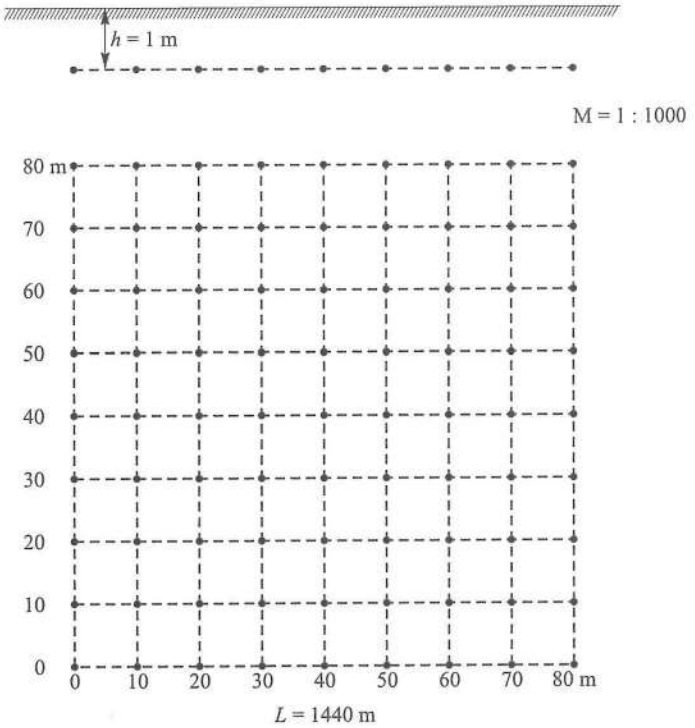


Sl. 21.9–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil po dijagonali na tlu.

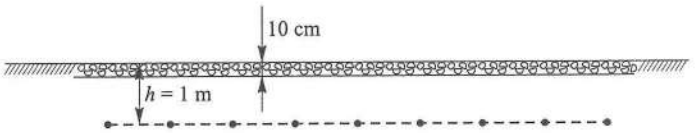
21.10. MREŽASTI UZEMLJIVAČ TS 110/10 kV

Izračunajte otpor uzemljenja i prikažite razdiobu potencijala za mrežasti uzemljivač prema slici 21.10–1a i 21.10–1b za sljedeće podatke:

- otpornost tla za uzemljivač prema slici 21.10–1.a), $\rho_z = 100\ \Omega\text{m}$, a prema slici 21.10–1.b) donjeg sloja $\rho_{z_2} = 100\ \Omega\text{m}$
- otpornost gornjeg sloja slika 21.10–1.b), debljine 10 cm (šljunka) $\rho_z = 2000\ \Omega\text{m}$
- ukupna duljina trakastog uzemljivača $L = 1440$ m koji je izrađen od bakrenog vodiča promjera 10 mm, presjeka 78,54 mm^2
- struja zemljospoja koja teče kroz mrežasti uzemljivač $I_z = 3000$ A
- zemljospojna zaštita namještena je na vrijeme $\leq 0{,}5$ s.



Sl. 21.10–1.a) Mrežasti uzemljivač 80 m × 80 m TS 110/10 kV u jednoslojnom tlu.

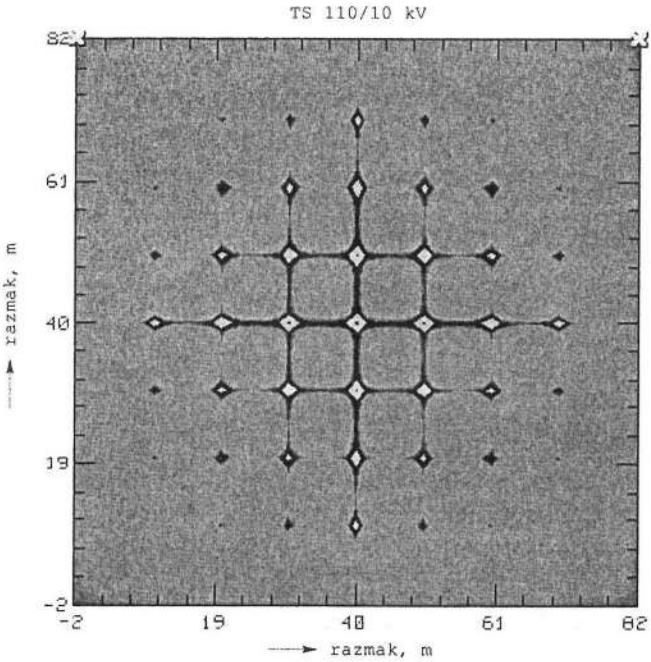


Sl. 21.10–1.b) Profil mrežastog uzemljivača 80 m × 80 m TS 110/10 kV sa slike 21.10–1.a) za nasipanje sloja šljunka debljine 10 cm.

REZULTATI PRORAČUNA

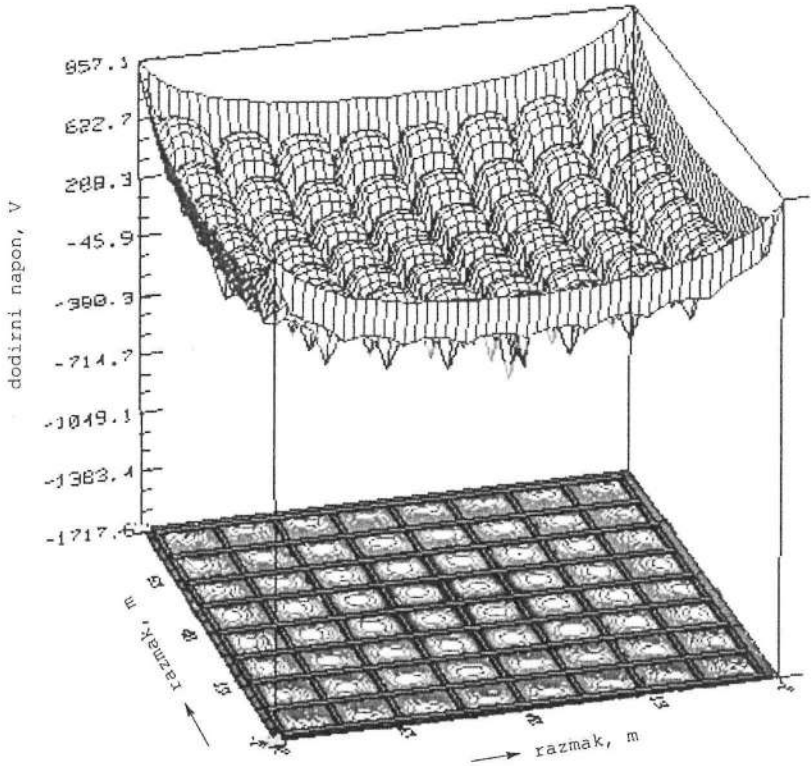
DIMENZIJE UZEMLJIVAČA
MREŽASTI UZEMLJIVAČ 80 m x 80 m, slika 21.10-1a (jednoslojno tlo)

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	0.8	80.0	0.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0002	0.0	10.0	0.8	80.0	10.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0003	0.0	20.0	0.8	80.0	20.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0004	0.0	30.0	0.8	80.0	30.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0005	0.0	40.0	0.8	80.0	40.0	0.8	80.00	0.0050	108.6285
0006	0.0	50.0	0.8	80.0	50.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0007	0.0	60.0	0.8	80.0	60.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0008	0.0	70.0	0.8	80.0	70.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0009	0.0	80.0	0.8	80.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0010	0.0	0.0	0.8	0.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0011	10.0	0.0	0.8	10.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0012	20.0	0.0	0.8	20.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0013	30.0	0.0	0.8	30.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0014	40.0	0.0	0.8	40.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	108.6285
0015	50.0	0.0	0.8	50.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0016	60.0	0.0	0.8	60.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0017	70.0	0.0	0.8	70.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0018	80.0	0.0	0.8	80.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043



Sl. 21.10–2. Profil potencijala na površini tla.

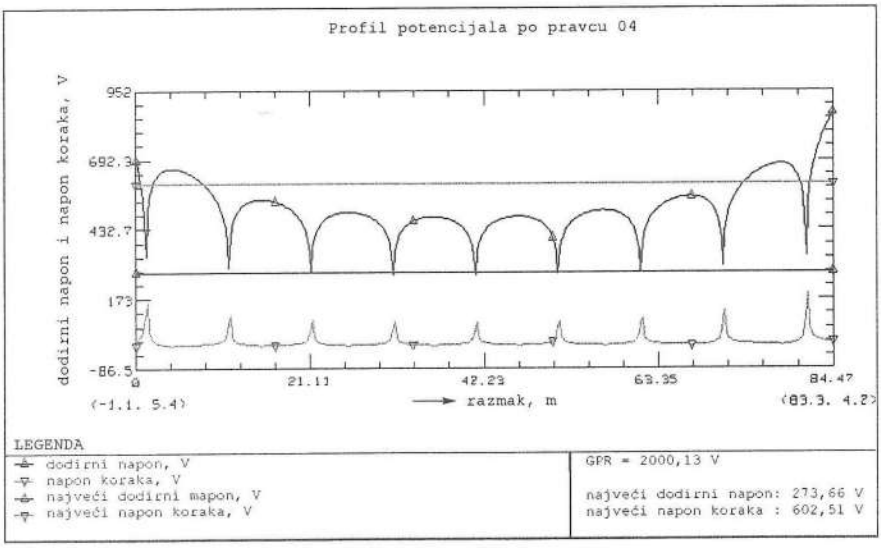
```
UKUPNA DULJINA UZEMLJIVAČA: 1440.00 m

POTENCIJAL UZEMLJIVAČA:  2000.13 V
OTPOR UZEMLJIVAČA      :   0.6667 Ω
```



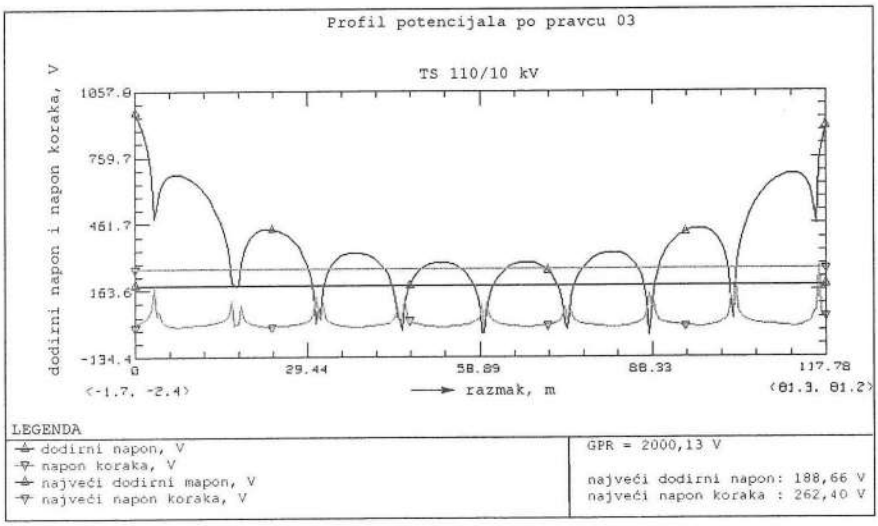
Sl. 21.10–3. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba u koordinatnom sustavu x, y, z.

```
*****************************************************************
Struja uzemljivača           : 3000.00 A
Dubina jednoslojnog tla      : 100.00 m
Otpornost tla                : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača (GPR) : 2000.13 V

Koordinate uzemljivača
X1: -2.00 m
Y1: -2.00 m
X2: 82.00 m
Y2: 82.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 273.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 602.51 V
```

```
Težina tijela : 50 kg
Nasuti sloj   : 0.00 m
Gornji sloj   : 100.00 Ωm
Donji sloj    : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 0.22
```



Sl. 21.10–4. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil paralelno po sredini prvog okca na tlu.



Sl. 21.10–4.a) Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil paralelno po dijagonali na tlu.

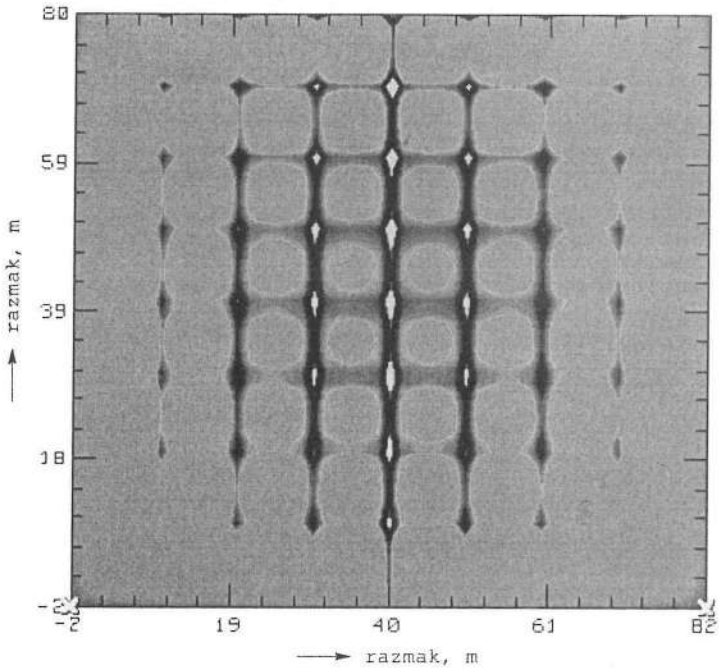
REZULTATI PRORAČUNA

==========

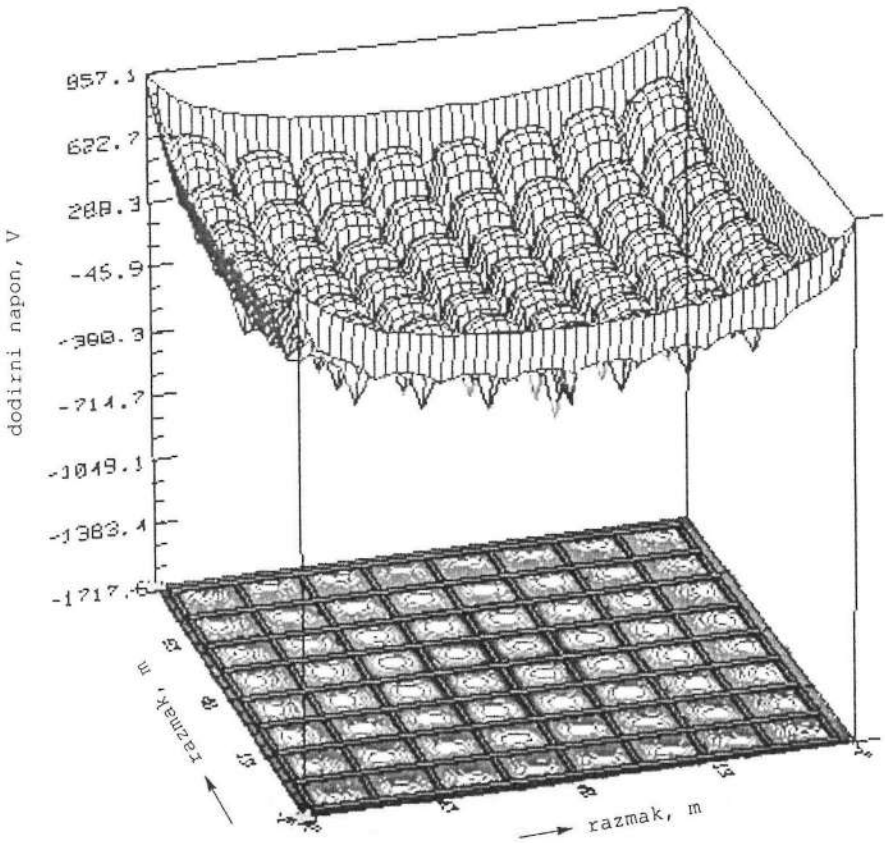
DIMENZIJE UZEMLJIVAČA

MREŽASTI UZEMLJIVAČ 80 m x 80 m, slika 21.10-1.b) (nasut šljunak)

Element	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Duljina,m	Polumjer,m	Struja,A
0001	0.0	0.0	0.8	80.0	0.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0002	0.0	10.0	0.8	80.0	10.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0003	0.0	20.0	0.8	80.0	20.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0004	0.0	30.0	0.8	80.0	30.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0005	0.0	40.0	0.8	80.0	40.0	0.8	80.00	0.0050	108.6285
0006	0.0	50.0	0.8	80.0	50.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0007	0.0	60.0	0.8	80.0	60.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0008	0.0	70.0	0.8	80.0	70.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0009	0.0	80.0	0.8	80.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0010	0.0	0.0	0.8	0.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043
0011	10.0	0.0	0.8	10.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0012	20.0	0.0	0.8	20.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0013	30.0	0.0	0.8	30.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0014	40.0	0.0	0.8	40.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	108.6285
0015	50.0	0.0	0.8	50.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	113.1948
0016	60.0	0.0	0.8	60.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	129.1945
0017	70.0	0.0	0.8	70.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	167.3478
0018	80.0	0.0	0.8	80.0	80.0	0.8	80.00	0.0050	285.9043



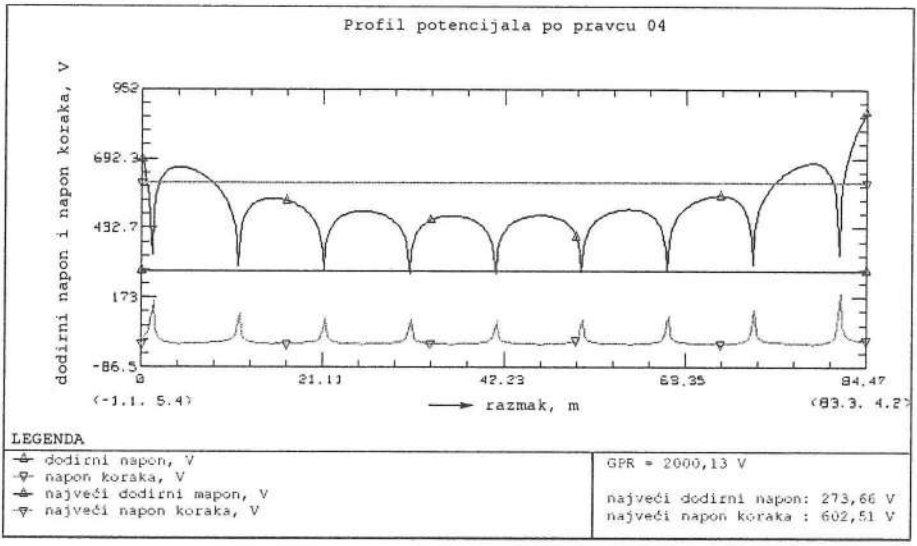
Sl. 21.10–5. Profil potencijala na površini tla mrežastog uzemljivača za tlo nasuto šljunkom.



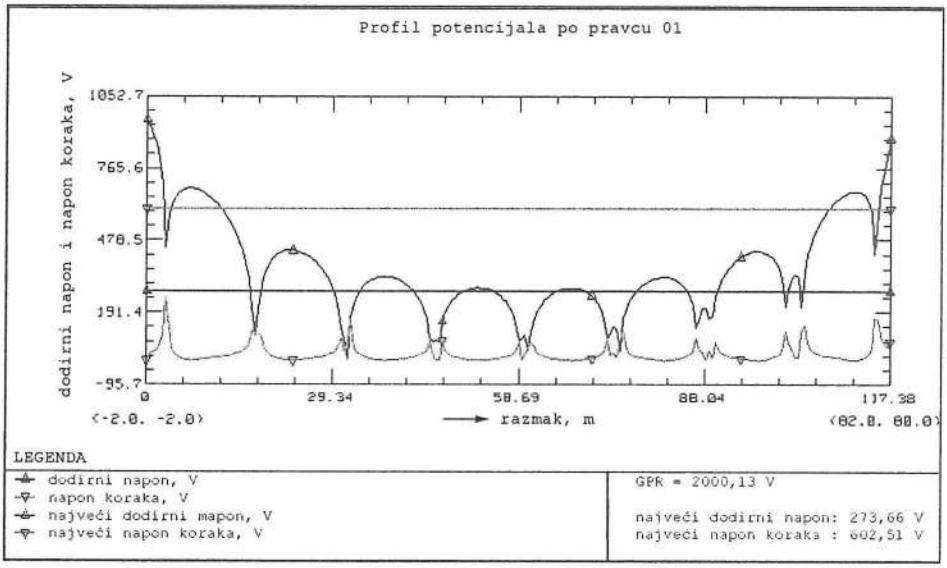
Sl. 21.10–6. Dodirni napon na površini tla i prostorna razdioba mrežastog uzemljivača u koordinatnom sustavu x, y, z za tlo nasuto šljunkom.

```
*****************************************************************
Struja uzemljivača      : 3000.00 A
Dubina jednoslojnog tla: 100.00 m
Otpornost tla           : 100.00 Ωm
Potencijal uzemljivača : 2000.13 V

Koordinate uzemljivača
X1: -2.00 m
Y1: -2.00 m
X2: 82.00 m
Y2: 82.00 m

Interval izračuna na svakih: 0.20 m

Najveći dopušteni dodirni napon: 273.66 V
Najveći dopušteni napon koraka : 602.51 V

Težina tijela: 50 kg
Nasuti sloj  : 0.01 m
```

```
Gornji sloj    : 100.00 Ωm
Donji sloj     : 100.00 Ωm
Trajanje kvara: 0.50 s
Redukcijski faktor C (IEEE 80): 0.22
```



Sl. 21.10–7. Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka koraka za profil paralelno po sredini prvog okca na tlu za tlo nasuto šljunkom.



Sl. 21.10–7,a) Profil dodirnog napona, napona koraka, najveći dodirni napon i napon koraka za profil paralelno po dijagonali na tlu za tlo nasuto šljunkom.

PRILOZI

P1. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV za područje uzemljenja (Sl. list br. 65/88, Narodne novine br. 53/91)

P1.1. Opće odredbe

Članak 72.

Pri uzemljenju vodova primjenjuju se i odredbe propisa o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V.

Članak 73.

Metalni i armiranobetonski stupovi visokonaponskih vodova, metalna sidrena užad i metalne trake na drvenim stupovima

P1.2. Uzemljenje u mrežama s kompenziranim zemljospojem i s izoliranom neutralnom točkom

Članak 74.

U mrežama visokog napona s izoliranom neutralnom točkom i mrežama s kompenziranom strujom zemljospoja uzima se da je trajanje zemljospoja duže, pa otpornost uzemljenja R_z kod stupova na obradivim površinama, pored prometnih putova i u naseljenim mjestima ne smije prijeći vrijednost danu formulom

$$R_z \leq \frac{U_z}{I_z}$$

gdje je:

$U_z = 125$ V najviši dopušteni napon na uzemljenju

I_z stvarna struja zemljospoja (A), koja teče na mjestu zemljospoja.

U mrežama s izoliranom neutralnom točkom I_z kapacitativna je struja zemljospoja, a u mrežama s kompenziranim zemljospojem – preostala struja zemljospoja.
Smatra se da je stup pored prometnog puta ako se nalazi na udaljenosti manjoj od 15 m od ruba kolnika.
Vrijednost otpornosti uzemljenja iz stavka 1. ovog članka ne smije biti prekoračena ako se stup voda nalazi na udaljenosti manjoj od 15 m od stambene zgrade, u ograđenom dvorištu, u okućnici koja se upotrebljava kao obradivo zemljište, u parku ili na šetalištu.

Članak 75.

Na vodovima sa zaštitnom užadi uzima se ukupna otpornost uzemljenja, računajući i vezu preko zaštitne užadi.

Članak 76.

Prekoračenje vrijednosti otpornosti R_z dopušta se ako se poduzme jedna od sljedećih mjera:

1) uporaba neprobojnih masivnih ili štapnih izolatora
2) redoviti pregled izolatora najmanje jedanput godišnje
3) ugrađivanje uređaja za signalizaciju zemljospoja i neposredno automatsko isključenje voda čim nastane kvar.

Posebne mjere za smanjenje napona koraka nisu potrebne ako je poduzeta jedna od mjera iz ovog članka.

P1.3. Uzemljenje u mrežama s uzemljenom neutralnom točkom

Članak 77.

Nadzemni vodovi koji pripadaju mreži s efikasno uzemljenom neutralnom točkom moraju imati uređaje za brzo automatsko isključenje pri zemljospoju, koji pouzdano isključuju dio u kvaru i tako uklanjaju opasnost od djelovanja napona na mjestu zemljospoja.

Članak 78.

Stupovi nadzemnih vodova iz članka 77. ovog pravilnika imaju po pravilu uzemljivač u obliku jednog ili dvaju prstenova oko svakog temelja ili oko svih temelja jednog stupa. Najmanja je dubina ukopavanja uzemljivača 0,5 m [zbog smrzavanja tla u kontinentalnom zemljištu i isušivanja tla u primorju]*.
Udaljenost prstenova od temelja, odnosno stupa mora biti takva da se postigne povoljnije izjednačenje potencijala, što ovisi o obliku i konstrukciji temelja stupa. [Pored prstenastog uzemljivača, temelj je stupa s armiranobetonskom konstrukcijom temeljni uzemljivač, te to doprinosi smanjenju ukupnog otpora uzemljenja jer su to dva paralelna otpora.]

* U Prilozime tekst u uglatim zagradama uvijek predstavlja primjedbu autora.

Članak 79.

Odredbe članka 78. ovog pravilnika ne primjenjuju se na stupovima u terenu s velikim specifičnim otporom, u kome se, uz racionalnu uporabu materijala, ne mogu postići zadovoljavajući rezultati otpora uzemljenja. Stupove na takvom terenu ne treba uzemljiti.

Članak 80.

U pogledu zaštite od opasnog napona na mjestu zemljospoja ne treba poduzimati druge posebne mjere osim mjera predviđenih u čl. od 77. do 79. ovog pravilnika. [Moguće je izvođenje uzemljenja uz primjenu sredstva za smanjenje specifičnog otpora tla, kako je to navedeno u poglavlju 2.]

P1.4. Uzemljenje za zaštitu od groma

Članak 81.

Da bi se pri udaru groma u stup ili zaštitno uže smanjila opasnost od preskoka na vodiče, treba prema odabranom stupnju izolacije voda odrediti najveći dopušteni otpor uzemljenja, uzimajući u obzir učestalost i jačinu gromova u području trase, sigurnost voda i učestalost kvarova.

Članak 82.

Ako se uzemljenjem izvedenim prema članku 78. ovog pravilnika ne postigne otpor koji omogućava zaštitu od groma, potrebno je međusobno povezivati pojedinačne uzemljivače ili postaviti još jedan prsten oko svih temelja stupa na dubinu od 1 m, odnosno položiti zrakaste uzemljivače ukupne duljine približne duljini uzemljivača prstena, ako je to povoljnije s obzirom na teren.
Ako se postupkom iz stavka 1. ovog članka ne postigne otpor koji štiti od povratnog preskoka, odustaje se od daljeg polaganja uzemljivača.

Članak. 83.

Povratni preskok na vodiču nije vjerojatan ako je za otpor uzemljenja ispunjen uvjet prema sljedećoj formuli:

$$R_{zST} \leq \frac{U_i}{I_u}$$

gdje je:

R_{zST} otpor uzemljenja (Ω) promatranog stupa, bez spoja sa zaštitnom užadi
U_i podnosivi udarni napon (kV) izolacije promatranog stupa u suhom;
I_u temeljna vrijednost udarne struje munje (kA) za promatrani stup.

Pri izboru I_u kao orijentacija mogu poslužiti vrijednosti dane u tablici P1–1. koje pokazuju za koliko postotaka od svih udara groma uzetih kao 100 % vrijednost struje iz prvog reda tablice P1–1. neće biti premašena. Vrijednosti struja manje od 20 kA mogu se uzeti samo za vodove napona do 35 kV.
Osnova za određivanje struje koja nastaje od udara groma su podaci o učestalosti atmosferskog pražnjenja, broj grmljavinskih dana u godini ili broj udara groma po jedinici površine, distribucija tjemene vrijednosti struje u stazi groma i željena razina sigurnosti s obzirom na vjerojatni broj povratnih preskoka u jednoj godini.

Tablica P1–1.

Struja koja nastaje od udara groma u stup, kA	5	10	15	20	30	40	50	60
Udio od svih udara groma u %	14	40	62	79	91	95	98	99

Članak 84.

Otpor uzemljenja s kojom se računa pri udarnim naponima groma približno je jednak otporu uzemljenja koji se dobiva uobičajenim mjerenjima.

P1.5. Uzemljenje zaštitne užadi

Članak 85.

Zaštitno uže na metalnim stupovima može se uzemljiti preko konstrukcije bez posebnog voda za uzemljenje ako je konstrukcija uzemljena. Iznad temelja konstrukcije mora postojati stezaljka za priključak uzemljivača.

Članak 86.

Zaštitno uže na armiranobetonskim stupovima može se uzemljiti preko čelične armature u betonu ako presjek armature iznosi najmanje 50 mm^2 i ako svi dijelovi armature koji služe za uzemljenje imaju pouzdan kontakt.
Odredba stavka 1. ovog članka odnosi se i na nosač izolatora.
Ako armatura armiranobetonskih stupova služi za uzemljenje, mora imati izvod iznad temelja za priključenje uzemljivača.

Članak 87.

Na drvenim stupovima uzemljenje se ne izvodi, osim ako nose zaštitno uže ili ako metalne dijelove treba uzemljiti. U tom slučaju uzemljenje se izvodi kao kod metalnih i armiranobetonskih stupova.
Ako nosači izolatora nisu uzemljeni, vod za uzemljenje zaštitnog užeta treba odmaknuti ili izolirati od glave stupa i time spriječiti galvansku vezu s nosačima.
Na drvenim stupovima zaštitno uže mora se uzemljiti na svakom stupu, najmanje na svakih 300 m dužine voda.
Ako su drveni stupovi usidreni, moraju se uzemljiti metalni dijelovi za pričvršćenje izolatora i sidra, kao i sidro u zemlji.

P1.6. Vodovi za uzemljenje

Članak 88.

Vodovi za uzemljenje (zemljovodi) postavljaju se radi galvanske veze između zaštitne užadi i uzemljivača.
Najmanji su dopušteni presjeci vodova za uzemljenje:

1) za čelik pocinčan toplim postupkom 50 mm^2
2) za aluminij 35 mm^2
3) za bakar 16 mm^2.

Stvarni presjeci vodova za uzemljenje moraju biti dimenzionirani prema očekivanoj struji zemljospoja.

Članak 89.

Ako se goli zemljovodi polažu u zemlju, smatraju se dijelom uzemljivača.

Članak 90.

Ako se na mjestu prelaska zemljovoda u zemlju očekuje pojačana korozija, potrebno je da se vod zaštiti premazivanjem, da se poveća presjek ili da se primijeni koja druga zaštitna mjera.

Članak 91.

Ako postoji opasnost od mehaničkog oštećenja, zemljospoj se mora zaštititi.

Članak 95.

Na uzemljivače i zemljovode, pored odredaba ovog pravilnika, primjenjuju se i odredbe propisa o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V.

P2. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadajućih tranformatorskih stanica za područje uzemljenja (Sl. list br. 13/78, Narodne novine br. 53/91)

P2.1. Zaštita od previsokog napona dodira

Članak 4.

Kao previsok (opasan) napon dodira, u smislu ovog pravilnika, smatra se trajan dodirni napon efektivne vrijednosti veće od:

- 125 V u trafostanici, odnosno
- 65 V izvan trafostanice i u niskonaponskoj mreži

Trajni je napon dodira svaki napon dodira koji se održava više od 1 s.

Članak 5.

Ako se mjesto zemljospoja (kvara) isključuje djelovanjem odgovarajuće zaštite u vremenu kraćem od 1 s, dopušteno je da naponi dodira budu veći od danih u članku 4. ovog pravilnika.

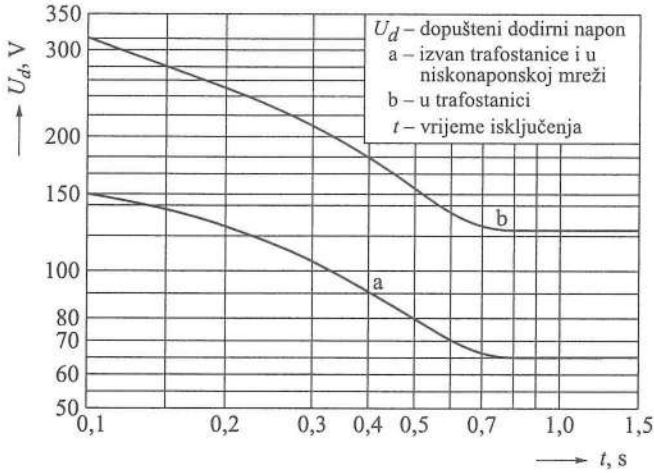
Vrijednosti dopuštenog dodirnog napona (U_d) u ovisnosti o vremenu trajanja isključenja (t) na mjestu kvara, biraju se prema krivuljama opasnosti na slici P2–1.

Kao vrijeme isključenja (t) mjesta kvara uzima se vrijeme djelovanja najbliže predviđene zaštite.

Članak 6.

Ako postoji mogućnost iznošenja opasnih potencijala izvan trafostanice (npr. preko nultog vodiča pri primjeni nulovanja, preko metalnih plašteva kabela i sl.) [ili pri izvedbi združenog radnog i zaštitnog uzemljenja u sustavu zaštite od opasnog dodirnog napona

TN-nulovanje] tada se dopušteni dodirni napon (U_d) u trafostanici i izvan nje bira prema krivulji opasnosti »a« na slici P2–1.



Sl. P2–1. Dopušten dodirni napon u ovisnosti o vremenu isključenja, u trafostanici krivulja b i izvan trafostanice krivulja a.

Članak 7.

Radi sprječavanja nastanka i održavanja previsokog napona dodira, pri izgradnji i rekonstrukciji trafostanica i niskonaponskih mreža moraju se upotrebljavati samo naprave, uređaji, vodovi i ostali elementi koji su izrađeni u skladu s propisima koji su na snazi.
Električne instalacije u objektima (zgradama) koje se priključuju na niskonaponsku mrežu moraju također biti izvedene u skladu s propisima koji su na snazi, i zajedno s trošilima moraju se pravilno i redovito održavati.

Članak 8.

Radi sprečavanja pojave previsokih napona dodira u instalacijama objekata (zgrada), zbog unošenja opasnih potencijala, potrebno je u objektima (zgradama) provesti mjere izjednačavanja potencijala.
Efikasnost mjera izjednačavanja potencijala provjerava se mjerenjem. Izjednačavanje potencijala uspješno je provedeno ako se mjerenjem otpora između zaštitnog kontakta električne instalacije i metalnih dijelova drugih instalacija dobije vrijednost manja od 2 Ω u bilo kojoj prostoriji objekta (zgrade).
Za veće objekte (zgrade) dovoljno je izvršiti mjerenja u prostorijama koje su najudaljenije od mjesta gdje je izvršeno galvansko povezivanje, npr. mjerenjem na posljednjem katu objekta (zgrade). Pri mjerenju otpora U/I metodom, napon mjerenja ne smije prijeći 65 V, pri čemu struja mjerenja treba biti veća od 5 A.

Članak 9.

Kao zaštitne mjere od previsokog napona dodira u niskonaponskoj mreži primjenjuju se [u našim uvjetima]:

- nulovanje
- zaštitno uzemljenje
- zaštitno izoliranje
- zaštitne strujne sklopke ili
- zaštitne naponske sklopke
- [mali napon ($U < 50$ V)].

P2.2. Opći uvjeti za nulovanje u niskonaponskoj mreži [TN-sustav]

Članak 10.

Nulovanje se postiže povezivanjem provodnih dijelova štićenog uređaja koji normalno nisu pod naponom, a koji zbog neke pogreške ili kvarova mogu doći pod napon sa nultim vodičem.

Članak 11.

Osnovni je uvjet za nulovanje da struja pogreške (I_k) koja nastaje pri potpunom kratkom spoju faznog vodiča s nultim vodičem ili dijelom naprave, odnosno instalacije koja je nulovanjem zaštićena, bude veća ili bar jednaka struji isključenja (I_i) pripadajućeg instalacijskog osigurača, automatskog osigurača, odnosno zaštitnog prekidača:

$$I_k \geq I_i$$

Članak 12.

Pri određivanju struje pogreške (I_k) uzima se impedancija cijele petlje kratkog spoja zajedno s prijelaznim otporima. Impedancija petlje treba zadovoljavati uvjet:

$$Z_k \leq \frac{U_f}{I_i} = \frac{U_f}{k_f I_n}$$

gdje je:

Z_k impedancija, Ω
U_f napon faznog vodiča prema zemlji, V
$I_i = k_f I_n$ struja isključenja, A
I_n nominalna struja osigurača (topljivog ili automatskog) ili postavljena struja okidača automatskog prekidača, A.

Struja isključenja (I_i) zaštitnog uređaja treba osigurati dovoljno brzo isključenje kvara. Faktor (k) odnosi se na vanjske vodove (zračne i kabelske), uključujući kućni priključak i instalacijske osigurače glavnih razvodnih vodova u glavnom razvodnom ormaru, i ima vrijednost:

- $k_f > 1{,}25$ za automatske prekidače s elektromagnetskim osiguračima
- $k_f > 2{,}5$ za osigurače (topljive ili automatske).

Članak 13.

Granična dužina niskonaponskog voda do koje je zaštita nulovanjem efikasna može se orijentacijski procijeniti iz uvjeta:

$$L_g \leq \frac{U_f}{k_f I_n \sqrt{\left(\frac{A_p}{S_f} + \frac{A_p}{S_n}\right)^2} + B_p}$$

gdje je:

L_g granična duljina voda, m
U_f napon faznog vodiča prema zemlji, V
$I_i = k_f I_n$ struja isključenja u smislu članka 12, A
S_f i S_n presjeci faznog, odnosno nultog vodiča, mm^2
A_p i B_p parametri koji imaju vrijednosti prema tablici P2–1.

Tablica P2–1. Parametri A_p i B_p za kabelsku i nadzemnu mrežu.

	Kabelski vod		Nadzemni vod			
	Bakreni vodiči (Cu)	Aluminijski vodiči (Al)	Bakreni vodiči (Cu)		Aluminijski vodiči (Al)	
			$S_f < 35$ mm^2	$S_f > 35$ mm^2	$S_f < 35$ mm^2	$S_f > 35$ mm^2
A_p	19	32	19	19	32	32
B_p	0,001	0,01	0,45	0,34	0,45	0,34

Članak 14.

Provjeru osnovnog uvjeta za primjenu nulovanja treba izvršiti mjerenjem impedancije petlje (Z_k) na mjestu priključenja nulovanih objekata, bez obzira na veličinu procijenjene granične duljine (L) niskonaponskog voda proračunane prema uvjetu iz članka 13. ovog pravilnika. Ta se provjera provodi na objektima koji su najviše udaljeni od trafostanice.

Članak 15.

Nulti vodič niskonaponske mreže treba obvezatno uzemljiti kod napojne trafostanice i na više mjesta u niskonaponskoj mreži.

Članak 16.

Svaki novi objekt (zgrada) treba po pravilu imati temeljni uzemljivač [(odnosno uzemljivač)] s kojim se povezuje nulti vodič niskonaponske mreže, čime se dobiva mala ukupna otpornost uzemljenja i pri nepovoljnim električnim karakteristikama tla.

Članak 17.

Dopušteno je povezivanje nultih vodiča susjednih niskonaponskih izvoda iste trafostanice, kao i povezivanje nultih vodiča niskonaponskih mreža susjednih trafostanica pod uvjetom da su presjeci nultih vodiča jednaki ili da imaju vrijednosti dvaju susjednih standardnih presjeka.

Članak 18.

Izbor najmanjeg presjeka nultog vodiča visokonaponskog voda u odnosu na presjek faznog vodiča obavlja se u skladu s propisima o izvođenju elektroenergetskih instalacija u zgradama koji su na snazi.

Članak 19.

Ukupna otpornost uzemljenja nultog vodiča, pored zadovoljenja uvjeta za nulovanje u niskonaponskoj mreži, treba da ima takvu vrijednost koja će onemogućiti pojavu ili održavanje napona dodira većih od danih na krivulji opasnosti »a« na slici P2–1 koji bi bili posljedica proboja izolacije visokonaponskog dijela trafostanice prema niskom naponu. Ta otpornost mjeri se u trafostanici zajedno s uzemljenjem trafostanice, i zajedno sa svim ostalim uzemljivačima koji su vezani za nulti vodič u trafostanici i u niskonaponskoj mreži.

Članak 20.

U napojnoj trafostanici i u glavnim razvodnim ormarima potrošača treba staviti vidno upozorenje da je kao zaštitna mjera primijenjeno nulovanje.

P2.3. Posebni uvjeti za nulovanje u kabelskoj niskonaponskoj mreži

Članak 21.

Nulti vodič kablovske niskonaponske mreže vezuje se za združeno uzemljenje trafostanice, odnosno za radno uzemljenje, ako ono mora biti odvojeno od zaštitnog uzemljenja. Za nulti vodič vezuju se i svi uzemljivači objekata (zgrada) nulovane niskonaponske mreže. Raspored tih uzemljivača u odnosu na uzemljivač trafostanice, kao i vrijednost njihovih otpora rasprostiranja [uzemljenja] nisu strogo ograničeni. Iznimka su samo objekti (zgrade) koji se nalaze na kraju nekog voda s jednostranim napajanjem nultog vodiča, a koji nemaju izvedene temeljne uzemljivače i provedene mjere izjednačavanja potencijala i čiji otpor uzemljenja pojedinačno ne smije biti veći od 10 Ω.

Članak 22.

U kabelskoj niskonaponskoj mreži nuluju se:

- metalni kabelski razvodni ormari izvan zgrade ili u zgradi i priključne kutije
- metalni i armiranobetonski stupovi javnog osvjetljenja i prometne signalizacije
- metalni plaštevi i armature kabela i metalne kabelske glave.

Članak 23.

Nadzemna niskonaponska mreža izvedena sa samonosivim kabelima treba zadovoljiti iste uvjete za nulovanje kao i podzemna kabelska mreža.

P2.4. Posebni uvjeti za nulovanje u nadzemnoj niskonaponskoj mreži

Članak 24.

Nulti vodič nadzemne niskonaponske mreže uzemljuje se kod trafostanice i na svakom radijalnom ogranku dužem od 200 m. Pri tome ukupni otpor uzemljenja nultog vodiča niskonaponske mreže, mjeren u trafostanici bez odvajanja uzemljenja trafostanice, ne smije biti veći od 5 Ω.

Članak 25.

Uzemljenje svakog radijalnog ogranka mreže dužeg od 200 m izvodi se s pomoću jednog uzemljivača na kraju ogranka ili s više uzemljivača raspoređenih na duljini od najviše 200 m, gledano od kraja ogranka. Pri tome ukupni otpor uzemljenja ovih uzemljivača ne smije biti veći od 10 Ω.
Iznimno, otpor uzemljenja iz stavka 1. ovog članka može biti i veći od 10 Ω ako se na krajevima radijalnih ogranaka nalaze objekti (zgrade) u kojima su izvedeni temeljni uzemljivači i ako je provedena mjera izjednačavanja potencijala.

Članak 26.

Ako u jednom dijelu niskonaponske mreže nisu ispunjeni uvjeti za nulovanje, tada se u toj mreži može primijeniti nulovanje ako su u objektima na spomenutom dijelu mreže primijenjene zaštitne strujne ili zaštitne naponske sklopke.

Članak 29.

Metalni stupovi niskonaponske mreže, priključne kutije i kabelske glave na kabelskim priključcima na nadzemnu mrežu, ne nuluju se niti se primjenjuju druge zaštitne mjere. Isto vrijedi i u slučaju da se u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača primjenjuje zaštitno uzemljenje s pomoću pojedinačnih uzemljivača.
Iznimno, ako se elementi niskonaponske mreže navedeni u stavku 1. ovog članka nalaze na površinama kao što su kupališta, igrališta, školska dvorišta, kampovi i sl. primjenjuje se jedna od slijedećih zaštitnih mjera:

- zaštitno izoliranje (s pomoću kabelskih priključnih kutija, kabelskih glava i sl. sa sintetičkom izolacijom)
- izoliranje stajališta širine najmanje 1,25 m (asfaltiranjem ili posipanjem krupnim slabo provodnim šljunkom)
- oblikovanje potencijala (polaganjem uzemljivača na razdaljini od 1 m i na dubini od 0,5 m)
- vezivanje za neki bliski zajednički uzemljivač,
- zaštita s pomoću strujnih zaštitnih sklopki na dijelu niskonaponskog voda u kome se nalaze ovi elementi.

Članak 30.

Ako se na istim stupovima nalaze vodiči visokog i niskog napona, zaštitne mjere od previsokog napona dodira i koraka primjenjuju se u skladu sa važećim propisima o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova tretirajući stupove kao dijelove visokonaponskog voda, bez obzira da li je u niskonaponskoj mreži primijenjeno nulovanje ili neka druga zaštitna mjera.

P2.5. Primjena zaštitnog uzemljenja u niskonaponskoj mreži

Članak 31.

Zaštitno uzemljenje se izvodi spajanjem svih vodljivih dijelova objekata, koje treba zaštititi od previsokog napona dodira sa zaštitnim uzemljivačem, odnosno uzemljivačima.
U napojnoj trafostanici mora se uzemljiti neutralni vodič niskonaponske mreže.

Članak 32.

Zaštitno uzemljenje se izvodi kao:

- uzemljenje pomoću zajedničkog uzemljivača
- uzemljenje pomoću pojedinačnih uzemljivača.

Članak 33.

Uzemljivanje pomoću zajedničkog uzemljivača ostvaruje se izravnom vezom zaštitnog uzemljivača objekta i radnog uzemljenja trafostanice namjenski izvedenim spojem. Kao zajednički uzemljivač upotrebljava se:

- metalni cjevovod (vodovod)
- posebno položen uzemljivač
- metalni plašt kabela.

Članak 34.

U slučaju primjene zaštitnog uzemljenja pomoću zajedničkog uzemljivača, zaštita treba da osigura brzo isključenje struje dozemnih kvarova u zaštićenom objektu.
Osnovni uvjet za primjenu ove zaštitne mjere je da struja pogreške (I_k) bude veća ili jednaka struji isključenja (I_i) pripadajućeg instalacijskog osigurača, automatskog osigurača odnosno zaštitne sklopke:

$$I_k \geq I_i$$

Članak 35.

Ako se objekti niskonaponske mreže štite zaštitnim uzemljenjem pomoću pojedinačnih uzemljivača treba da budu ispunjeni sljedeći uvjeti:

$$R_z \leq \frac{65}{I_i}$$

$$R_0 \leq \frac{65}{I_{i\,\mathrm{maks}}}$$

gdje je:

R_z	otpor zaštitnog uzemljenja pojedinačnog uzemljivača, Ω
$I_i = k_f I_n$	struja isključenja, A, u smislu članka 12. ovog pravilnika
R_0	ukupna otpornost radnog (pogonskog) uzemljenja, Ω
$I_{i\,\mathrm{maks}}$	najveća od struja isključenja štićenih objekata u niskonaponskoj mreži, A.

Članak 36.

Kabelski razvodni ormari, kabelske priključne kutije, stupovi javnog osvjetljenja i prometne signalizacije, ne mogu se uspješno zaštiti zaštitnim uzemljenjem s pomoću pojedinačnih uzemljivača. Zato se za te elemente niskonaponske mreže primjenjuje jedna od zaštitnih mjera predviđenih odredbama članka 29. stavka 2. ovog pravilnika, bez obzira na mjesto ugradnje.
[Zaštitno uzemljenje kao sustav zaštite od opasnog dodirnog napona ne izvodi se, iako je to prema navedenom pravilniku točka P3.5 moguće, zbog nedostatne sigurnosti i pouzdanosti i rentabilnosti u usporedbi s TN-sustavom].

P2.6. Primjena ostalih zaštitnih mjera u niskonaponskoj mreži

Članak 37.

Zaštitno izoliranje elemenata niskonaponske mreže, kao i korištenje strujnih zaštitnih i naponskih zaštitnih sklopka provodi se prema propisima za izvođenje elektroenergetskih instalacija u zgradama koji su na snazi.

P2.7. Uvjeti primjene nulovanja i zaštitnog uzemljenja u istoj niskonaponskoj mreži

U istoj niskonaponskoj mreži dopušten je rad objekata štićenih nulovanjem i objekata štićenih zaštitnim uzemljenjem, pod uvjetom da se pri dozemnom spoju u bilo kojem objektu štićenom zaštitnim uzemljenjem na nultom vodiču niskonaponske mreže ne pojavi napon veći od 65 V, a ako se pojavi, da će se održati samo najkraće vrijeme, tj. do isključenja strujnog kruga djelovanjem osigurača (topljivog ili automatskog) ili zaštitnog prekidača.
Uvjeti iz stavka 1. ovog članka vrijede za niskonaponske mreže nazivnog napona 3 × 380/ /220 V.

Članak 39.

U istoj niskonaponskoj mreži dopušten je rad objekata štićenih nulovanjem i objekata štićenih zaštitnim uzemljenjem s pomoću zajedničkog uzemljivača.
Ako su u jednom transformatorskom području niskonaponske mreže objekti štićeni nulovanjem, a u susjednom transfonnatorskom području objekti štićeni zaštitnim uzemljenjem s pomoću zajedničkog uzemljivača, nulti i neutralni vodič tih dvaju tranformatorskih područja mogu se međusobno povezati, ukoliko su njihovi presjeci jednaki ili imaju vrijednosti dvaju susjednih standardnih presjeka.

Članak 40.

U istoj niskonaponskoj mreži dopušten je rad objekata štićenih nulovanjem i objekata štićenih uzemljenjem pomoću pojedinačnih uzemljivača ako je ispunjen uvjet:

$$R_{\Sigma 0} \leq \frac{R_{z\,\min}}{2{,}5} = 0{,}4 R_{z\,\min}$$

gdje je:

$R_{\Sigma 0}$ ukupan otpor uzemljenja nultog vodiča cjelokupne niskonaponske mreže, zajedno sa uzemljivačima transformatorskih stanica i svim ostalim uzemljivačima koji se vezuju na nulti vodič, Ω

$R_{z\,\min}$ najmanji od svih otpora uzemljenja objekata zaštićenih s pomoću pojedinačnih uzemljivača, Ω.

Ako su u jednom transformatorskom području niskonaponske mreže objekti zaštićeni nulovanjem, a u susjednom transformatorskom području objekti zaštićeni zaštitnim uzemljenjem s pomoću pojedinačnih uzemljivača, nulti i neutralni vodič tih dvaju područja mogu se međusobno povezati, ako je ispunjen uvjet iz stavka 1. ovog članka. Taj uvjet

mora biti ispunjen prije povezivanja nultog i neutralnog vodiča na granici transformatorskih područja, pri čemu presjeci nultog i neutralnog vodiča trebaju biti jednaki ili imati vrijednosti dvaju susjednih standardnih presjeka.

Članak 41.

Ako ukupna otpornost uzemljenja nultog vodiča iznosi $R_0 < 0{,}20\ \Omega$, u istoj niskonaponskoj mreži dopušten je rad objekata zaštićenih nulovanjem i objekata zaštićenih zaštitnim uzemljenjem s pomoću pojedinačnih uzemljivača bez provjere veličine otpornosti uzemljenja pojedinačnih uzemljivača.
Ako su u jednom transformatorskom području niskonaponske mreže objekti zaštićeni nulovanjem, a ukupna otpornost uzemljenja nultog vodiča iznosi $R_0 < 0{,}20\ \Omega$, taj nulti vodič može se vezati za neutralne (nulte) vodiče susjednih transformatorskih područja neovisno o tome kakav je sustav zaštite u njima primijenjen, ako su presjeci nultih (neutralnih) vodiča jednaki ili imaju vrijednost dvaju susjednih standardnih presjeka.
Uvjet $R_0 < 0{,}20\ \Omega$ mora biti ispunjen prije povezivanja nultog vodiča s neutralnim (nultim) vodičima susjednih transformatorskih područja.

Članak 42.

Ako su u jednoj niskonaponskoj mreži objekti zaštićeni zaštitnim uzemljenjem s pomoću pojedinačnih uzemljivača, onda se na istu mrežu mogu pojedinačno priključiti objekti u kojima je zaštita izvedena nulovanjem, ako svaki nulovani objekt ispunjava sljedeće uvjete:

- da je instalacija u svakom nulovanom objektu izvedena s posebnim zaštitnim vodičem
- da svaki nulovani objekat ima temeljni uzemljivač na koji se vezuje nulti vodič i da je provedena mjera izjednačavanja potencijala.

Članak 43.

Ako nije ispunjen ni jedan od uvjeta navedenih u čl. 40. 41. i 42. ovog pravilnika, tada se u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača u kojima je provedeno nulovanje zabranjuje uporaba zaštitnog uzemljenja s pomoću pojedinačnih uzemljivača bez spoja nultog vodiča s tim zaštitnim uzemljenjem.

P2.8. Primjena zaštitnih mjera u [transformatorskim stanicama 10(20)/0,4 kV]

Članak 44.

Izbor uzemljenja i uzemljivača, kao i njihovo dimenzioniranje, provodi se ovisno o parametru visokonaponske i niskonaponske mreže, vodeći računa o termičkoj stabilnosti uzemljivača i o zaštiti od previsokih napona dodira u trafostanicama, niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača.

Članak 45.

Uzemljivači trafostanica trebaju termički podnijeti struje različitih kratkih spojeva u visokonaponskoj i niskonaponskoj mreži, ovisno o vrsti uzemljenja neutralne točke visokonaponske mreže, i ovisno o načinu izvođenja uzemljenja trafostanica.

Članak 46.

Računska provjera i dimenzioniranje uzemljivača prema termičkim naprezanjima provodi se za slučaj pojave dvostrukog zemljospoja (koji je moguć jedino u visokonaponskoj mreži čija je neutralna točka izolirana ili je primijenjena kompenzacija struje zemljospoja, u sljedećim slučajevima:

- ako vrijeme trajanja jednostrukog zemljospoja nije ograničeno na najviše 2 h
- ako se svaki dvostruki zemljospoj ne isključuje djelovanjem zaštite bez vremenskog odlaganja.

Članak 47.

Proračun uzemljivača trafostanice prema termičkom naprezanju u slučajevima navedenim u članku 46. ovog pravilnika provodi se prema veličini dijela struje dvostrukog zemljospoja koji prolazi kroz uzemljivač trafostanice i zemlju. Taj dio struje dobiva se množenjem ukupne struje dvostrukog zemljospoja s redukcijskim faktorom, kojim se obuhvaća utjecaj metalnih plašteva visokonaponskih kabela i ostalih metalnih dijelova koji se vezuju na uzemljenje trafostanice na raspodjelu struje kvara u trafostanici.
Za nadzemne visokonaponske vodove bez zaštitnog užeta redukcijski faktor iznosi $r_k = 1$.
Za kabelske je vodove i nadzemne vodove sa zaštitnim užetom $r_k < 1$. Točna vrijednost redukcijskog faktora određuje se mjerenjem. [Tipične vrijednosti redukcijskih faktora kabela i nadzemnih vodova navedene su u prilogu P9, dodatak J].
Kao ukupna struja dvostrukog zemljospoja, u smislu ovog pravilnika, uzima se vrijednost struje koja je jednaka 80 % od struje tropolnog kratkog spoja.

Članak 48.

U trafostanici se po pravilu izvodi združeno uzemljenje. Iznimno, radno i zaštitno uzemljenje izvode se kao posebna uzemljenja.

Članak 49.

Ako su ispunjeni uvjeti za uporabu združenog uzemljenja onda se po pravilu u trafostanici izvode samo zaštitno uzemljenje i na njega priključuje neutralni (nulti) vodič.
Iznimno, u trafostanicama s nadzemnim vodovima visokog i niskog napona (npr. trafostanice u obliku »tornjića« ili na stupu), radno i zaštitno uzemljenje izvode se posebno i naknadno medusobno povežu ako postoje uvjeti za uporabu združenog uzemljenja.

Članak 50.

Zaštitno uzemljenje trafostanice sastoji se od uzemljivača zaštitnog uzemljenja na koji se vezuju:

- svi metalni dijelovi visokonaponskih i niskonaponskih naprava i kućišta transformatora snage
- metalni plaštevi i ekrani energetskih kabela
- sekundarna struja kola mjernih transformatora
- uzemljenje visokonaponskih namotaja jednopolno izoliranih naponskih transformatora
- ventilni odvodnici prenapona

- neutralni (nulti) vodič niskonaponske mreže ako se zaštitno uzemljenje upotrebljava kao združeno uzemljenje
- ostali uzemljivači koji mogu utjecati na smanjenje ukupnog otpora zaštitnog uzemljenja.

Članak 51.

Ako se trafostanica izvodi kao poseban slobodno postavljeni objekt, onda se uzemljivač zaštitnog (združenog) uzemljenja po pravilu izvodi s jednom ili dvjema pravokutnim konturama i cijevnim uzemljivačima (sondama) na kutovima vanjske konture. Umjesto unutarnje konture u trafostanicama s armiranobetonskim ili metalnim vanjskim zidovima može se upotrebljavati uzemljivač u temelju trafostanice.
Ako iz tehničkih i ekonomskih razloga nije opravdano postavljanje cijevnih uzemljivača (sondi) iz stavka 1. ovog članka (npr. na kraškom zemljištu), uzemljivač zaštitnog (združenog) uzemljenja izvodi se na način koji najviše odgovara lokalnim uvjetima.

Članak 52.

Ako se trafostanica izvodi u sklopu kojeg drugog objekta (zgrade), uzemljivač zaštitnog (združenog) uzemljenja izvodi se u ovisnosti o lokalnim uvjetima raspoloživog prostora i ekonomičnosti gradnje.
Ako objekt (zgrada) u koji se smješta trafostanica ima izvedeni temeljni uzemljivač, onda se taj uzemljivač upotrebljava i za zaštitno (združeno) uzemljenje trafostanice.

Članak 53.

Ako se trafostanica napaja s pomoću visokonaponskih kabela s metalnim plaštevima provodnim prema zemlji, pri proračunu otpora zaštitnog (združenog) uzemljenja treba uzeti u obzir ulogu tih plašteva kao uzemljivača. Za proračun može se upotrijebiti analogija s trakastim uzemljivačima, uzimajući da metalni plašt kabela ima oko dva puta veći otpor rasprostiranja od otpora rasprostiranja trakastog uzemljivača iste duljine. U tom slučaju vodi se računa o pravcima polaganja kabela, kao i činjenici da se utjecaj kabela kao uzemljivača ispoljava na dužini od najviše 500 m od trafostanice.

Članak 54.

U niskonaponskoj mreži nazivnog napona od 3 × 380/220 V neutralnu točku mreže treba direktno uzemljiti spajanjem s radnim uzemljenjem.
Radno se uzemljenje po pravilu povezuje sa zaštitnim uzemljenjem (združeno uzemljenje), a iznimno se izvodi kao posebno uzemljenje.

Članak 55.

Ako je odvajanje radnog i zaštitnog uzemljenja uvjet za sprečavanje pojave i održavanja opasnih napona dodira u trafostanici i niskonaponskoj mreži, onda nije dovoljno samo fizičko odvajanje tih uzemljenja, već treba mjerenjem utvrditi da između njih ne dolazi do prenošenja električnog potencijala.
Smatra se da su radno i zaštitno uzemljenje efikasno razdvojeni ako se na jednom uzemljenju ne može pojaviti potencijal veći od 40 % potencijala drugog uzemljenja, s tim što uzemljivači tih dvaju uzemljenja trebaju biti medusobno udaljeni najmanje 20 m. Pored toga moraju biti ispunjeni i sljedeći uvjeti:

1) niskonaponski kabelski priključci iz trafostanice do prvog stupa, odnosno priključne kutije, moraju biti izvedeni s kabelima s izoliranim plaštem, a kabelske glave na tim priključcima u trafostanici moraju biti od izolacijskog materijala
2) u instalaciji za vlastite potrebe trafostanice ne smije se primijeniti nulovanje
3) neutralni vodič u trafostanici mora biti postavljen izolirano u odnosu na metalne dijelove vezane na zaštitno uzemljenje.

Članak 56.

Ako radno uzemljenje treba biti odvojeno od zaštitnog uzemljenja (iz čl. 59. i 64. ovog pravilnika), tada se radno uzemljenje po pravilu izvodi:

- s pomoću jednoga posebnog uzemljivača (npr. u vidu trokuta sa sondama u vrhovima trokuta) koji se s pomoću kabela s izoliranim plaštem spaja s neutralnim vodičom na niskonaponskoj razvodnoj ploči u trafostanici, ili
- s pomoću uzemljivača kod stupova ili objekata niskonaponske mreže u području promjera 200 m oko trafostanice.

Dimenzioniranje uzemljivača radnog uzemljenja provodi se suglasno s čl. od 10. do 35. ovog pravilnika, a u posebnim uvjetima rada visokonaponske mreže navedenim u članku 64. ovog pravilnika mora biti ispunjen i uvjet iz stavka 2. tog članka.

P2.9. Dimenzioniranje uzemljenja trafostanica ako je neutralna točka visokonaponske mreže uzemljenja preko malog otpora [s ograničenjem struje zemljospoja do 300 A ili 150 A, koje se danas izvode kao dva tipska rješenja]

Članak 57.

Ako je neutralna točka visokonaponske mreže na koju je priključena trafostanica uzemljena preko male otpornosti za ograničenje struje dozemnog kratkog spoja, onda se u trafostanici po pravilu izvodi združeno uzemljenje.
Ukupni otpor združenog uzemljenja (R_{zdr}), uračunavajući utjecaj visokonaponskih kabela s vodljivim plaštem kao uzemljivača, kao i utjecaj uzemljivača susjednih trafostanica i objekata (zgrada) koji su vezani za nulti (neutralni) vodič niskonaponske mreže, treba zadovoljiti uvjet:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{I_z} = \frac{U_d}{r_k \cdot I_k}$$

gdje je:

U_d dopušteni dodirni napon, V
I_z dio struje dozemnog kratkog spoja koji ide kroz uzemljenje trafostanice u zemlju, A
r_k redukcijski faktor odabran u skladu s člankom 47. stavka 2. ovog pravilnika
I_k ukupna struja dozemnog kratkog spoja, A.

Članak 58.

Kao dopušteni dodirni napon U_d, uzima se napon prema krivuljama opasnosti na slici P2–1 i to:

- prema krivulji opasnosti »a« ako je u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača kao zaštita od previsokog napona dodira primijenjeno nulovanje ili uzemljenje s pomoću zajedničkog uzemljivača
- prema krivulji opasnosti »b« ako je primijenjen koji drugi sustav zaštite od previsokog napona dodira, kada povišenje potencijala na neutralnom vodiču ne može prouzrokovati pojavu i održavanje visokih potencijala i opasnih napona dodira na kućištima aparata u instalacijama potrošača i elementima niskonaponske mreže.

Članak 59.

Ako u nekoj trafostanici nije moguće ispuniti uvjet iz članka 57. ovog pravilnika, radno uzemljenje treba izvesti posebno i razdvojeno od zaštitnog uzemljenja, u skladu s čl. 55. i 56. ovog pravilnika. U tom se slučaju dimenzioniranje tih uzemljenja vrši na slijedeći način:

- ukupni otpor radnog uzemljenja (R_{zr}) mjeren u trafostanici bez odvajanja neutralnog (nultog) vodiča niskonaponske mreže od uzemljivača radnog uzemljenja zajedno sa svim uzemljivačima objekata (zgrada) i ostalim uzemljivačima koji se vezuju za neutralni (nulti) vodič niskonaponske mreže, treba zadovoljiti uvjete primijenjene zaštite od previsokih napona dodira u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača
- ukupni otpor zaštitnog uzemljenja (R_{zz}) mjeren u trafostanici bez odvajanja uzemljivača zaštitnog uzemljenja od drugih uzemljivača koji su vezani na njega, treba zadovoljiti uvjet da se pri dozemnom kratkom spoju u visokonaponskom dijelu trafostanice na zaštitnom uzemljenju ne može pojaviti napon veći od 60 % ispitnog napona izolacije elemenata niskonaponskog dijela trafostanice i priključnih vodova, odnosno treba biti ispunjen uvjet:

$$R_{zz} \leq \frac{1200}{I_z} = \frac{1200}{r_k \cdot I_k}$$

Članak 60.

Pored ispunjenja uvjeta iz članka 59. ovog pravilnika moraju se u slučaju odvajanja radnog i zaštitnog uzemljenja poduzeti i posebne zaštitne mjere u trafostanici i oko nje da bi se naponi dodira ograničili na vrijednosti dane u krivuljama opasnosti na slici 18.3.1. Smatra se da su ti uvjeti zadovoljeni ako je u trafostanici s metalnim ili armiranobetonskim vanjskim zidovima položen uzemljivač u temelju na koji su priključeni svi metalni dijelovi konstrukcije i aparata u trafostanici, kao i vanjski uzemljivač zaštitnog uzemljenja. Ako nije izveden uzemljivač u temelju trafostanice, u trafostanici mora biti provedena jedna od sljedećih dodatnih zaštitnih mjera:

- stajališta za rukovanje trebaju biti od metala i trebaju se povezati s ostalim vodljivim dijelovima, pri čemu pristup do stajališta treba biti omogućen izoliranom stazom širine najmanje 1,25 m ili
- stajališta za rukovanje uređajima trebaju biti izolirana za najmanje dvostruki napon uzemljenja, pri čemu svi metalni dijelovi koji se mogu dohvatiti s mjesta za rukovanje trebaju biti međusobno povezani.

Oko trafostanice s metalnim ili armiranobetonskim vanjskim zidovima izvodi se jedna od sljedećih dodatnih zaštitnih mjera:

- izoliranje tla širine 1,25 m oko trafostanice (asfaltiranjem ili posipanjem krupnim slabo provodnim šljunkom) ili
- izjednačenje potencijala (polaganjem uzemljivača na razdaljini od 1 m od zida na dubini od 0,5 m).

Izoliranje tla oko trafostanice ili oblikovanje potencijala obvezatno je i u slučaju da je izveden uzemljivač u temelju.
Kod stupnih trafostanica uzemljivač se postavlja na udaljenosti od 1 m od stupa i na dubinu od 0,5 m i povezuje se sa svim metalnim dijelovima koje mogu dohvatiti s mjesta za rukovanje kao i sa zaštitnim uzemljivačem trafostanice.

Članak 61.

Ako se trafostanica nalazi na području urbaniziranog dijela naselja, gdje nije moguće izvršiti efikasno odvajanje radnog i zaštitnog uzemljenja zbog velike gustoće metalnih podzemnih instalacija (cjevovodi, uzemljivači zgrada, kabeli s vodljivim plaštom itd.), u trafostanici se izvodi združeno uzemljenje. Ako nije moguće izvesti uzemljenje prema članku 57. ovog pravilnika, moraju se poduzeti mjere tako da se u visokonaponskoj mreži struja dozemnog kratkog spoja ograniči na nižu vrijednost. U suprotnom, trafostanica se ne može priključiti na visokonaponsku mrežu koja je uzemljena preko male otpornosti.

P2.10. Dimenzioniranje uzemljenja trafostanice ako je visokonaponska mreža s izoliranom neutralnom točkom ili s kompenziranom strujom zemljospoja

Članak 62.

Ako visokonaponska mreža na koju se priključuje trafostanica radi s izoliranom neutralnom točkom ili s kompenziranom strujom zemljospoja po pravilu se u trafostanici izvodi združeno uzemljenje. [Danas se ne primjenjuje uzemljenje neutralne točke s kompenziranom strujom zemljospoja, ali postoje dokazi za primjenu uzemljenja neutralne točke visokonaponske mreže kombinacijom R, L, tj. s djelimičnom kompenzacijom kapacitivne struje zemljospoja i ograničenjem struje zemljospoja na određenu vrijednost].
Ukupna otpornost združenog uzemljenja (R_{zdr}) treba zadovoljiti uvjet:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{I_{zc}}$$

gdje je:

I_{zc} ukupna kapacitivna struja zemljospoja galvanski povezanih vodova visokonaponske mreže s izoliranom neutralnom točkom, odnosno preostala struja zemljospoja ako je visokonaponska mreža s kompenziranom strujom zemljospoja, A

U_d dopušteni dodirni napon iz članka 58. ovog pravilnika, ako se zemljospoj isključuje djelovanjem zemljospoja zaštite, V.

Članak 63.

Združeno uzemljenje izvodi se i u slučaju da se zemljospoj ne isključuje djelovanjem brze zemljospojne zaštite, ali je nastavljanje rada visokonaponske mreže sa zemljospojem ograničeno na najviše 2 sata, poslije čega se vod koji je u zemljospoju automatski ili ručno isključuje.

Dimenzioniranje ukupne otpornosti združenog uzemljenja (R_{zdr}) obavlja se kako je predviđeno u članku 62. ovog pravilnika, računajući s dodirnim naponima od 65 V, odnosno 125 V, kao trajnim dopuštenim dodirnim naponom

Članak 64.

Ako zemljospoj u visokonaponskoj mreži traje duže od 2 sata, smatra se da su stvoreni uvjeti za pojavu dvostrukog zemljospoja, koji može izazvati velika termička naprezanja uzemljivača trafostanica i veoma visoke napone dodira.
U slučaju iz stavka 1. ovog članka treba izvršiti odvajanje radnog i zaštitnog uzemljenja, pri čemu moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

1) zaštitno uzemljenje mora se izvesti kao uzemljenje u teškim uvjetima, suglasno članku 60. ovog pravilnika. Ako se dvostruki zemljospoj ne isključuje djelovanjem zaštite bez vremenskog odlaganja, mora se izršiti računska provjera presjeka elementa zaštitnog uzemljenja u odnosu na termička naprezanja, kako je to propisano ovim pravilnikom
2) radno uzemljenje treba zadovoljiti uvjet primjene zaštite od opasnih napona dodira u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača. Pored toga, ukupna otpornost radnog uzemljenja mjerena u trafostanici bez odvajanja neutralnog (nultog) vodiča od uzemljivača radnog uzemljenja i ostalih uzemljivača u niskonaponskoj mreži, treba imati vrijednost koja osigurava da se u slučaju proboja izolacije visokog napona prema radnom uzemljenju na tom uzemljenju ne može pojaviti i održati napon od 65 V, odnosno mora biti ispunjen i uvjet:

$$R_{zr} \leq \frac{65}{I_{zc}}$$

gdje je I_{zc} ukupna kapacitivna odnosno preostala struja zemljospoja.

Članak 65.

Ako se trafostanica nalazi na području urbaniziranog dijela naselja gdje nije moguće provesti odvajanje radnog i zaštitnog uzemljenja, izvodi se združeno uzemljenje, a ta trafostanica može se priključiti samo na visokonaponsku mrežu u kojoj je trajanje zemljospoja ograničeno na najviše 2 sata.

P3. Izvod iz tehničkih propisa o gromobranima, iz područja uzemljenja (Sl. list br. 4/74 i 13/78, Narodne novine br. 53/91)

P3.1. Materijal za vodove

3.21 Za gromobranske vodove može se upotrebljavati sljedeći materijal sljedećih dimenzija:

Materijal	Izvan zemlje	U zemlji
Pocinčana čelična žica	8 mm Ø	10 mm Ø
Pocinčana čelična traka	60 mm^2, ali ne tanja od 3,0 mm	100 mm^2, ali ne tanja od 3,5 mm
Bakrena žica	6 mm Ø	Ne preporučuje se
Aluminijska žica	10 mm Ø	Nije dopuštena
Aluminijska traka	100 mm^2, ali ne tanja od 3,5 mm	Nije dopuštena

3.22 Glavni odvodi i hvataljke trebaju odgovarati presjecima u stupcu »izvan zemlje«. Kad se metalni dijelovi zgrade upotrebljavaju kao hvataljke ili odvodi, trebaju imati presjek od najmanje 50 mm^2, a debljinu od najmanje 0,5 mm ako tim propisima nije određeno drukčije za pojedine slučajeve.

3.23 Na objektima čiji su vodovi jako izloženi koroziji zbog plinova i drugih sastojaka u zraku potrebno je vodove posebno zaštititi premazivanjem ili na koji drugi ekvivalentni način.

3.24 U zemlju se mogu polagati samo vodovi od masivnog materijala (obično od pocinčanog čelika). U zemlju se ne smiju polagati aluminijski vodovi.

3.25 Ako su krov na zgradi, obloga krova ili žlijeb bakreni, čelične i aluminijske vodove treba položiti tako da kišnica ne teče s bakrenih dijelova na čelične ili aluminijske vodove. Ako to nije moguće, treba upotrijebiti bakrene vodove.
Na krovovima od pocinčanog čeličnog lima ili aluminija nisu dopušteni odvodi od gole bakrene žice.

3.26 Na spojevima bakrenih i aluminijskih vodova potrebno je umetnuti uložak od dvostrukog materijala (Al-Cu). Pocinčani čelik i aluminij mogu se spajati neposredno.

3.27 Za potpore vodova upotrebljava se pocinčani čelik.
Na bakrenim vodovima potrebno je između potpora i bakrenog voda umetnuti uložak od olova odnosno kojega drugog materijala otpornog na atmosferske utjecaje ili treba upotrijebiti bakrene ili brončane potpore.

3.28 Radi zaštite od korozije dopušteno je premazivati vodove položene u zemlju.
Na ulazu vodova u zemlju potrebno je vodove zaštititi od korozije premazivanjem na dužini od 0,3 m u zemlji i 0,3 m iznad zemlje.
To isto vrijedi i za međusobne spojeve vodova ili za spojeve vodova s cjevovodima u zemlji ili pod žbukom.
Za zaštitu od korozije preporučuje se premazivanje bitumenom ili zaštitni omot.

P3.2. Uzemljenja

3.61 Ispravno i propisano izvedeno uzemljenje bitno je za ispravno djelovanje gromobrana, i tom dijelu instalacije treba pokloniti posebnu pozornost.

3.611 Djelovanje gromobranskog uzemljenja karakterizira udarni otpor rasprostiranja [uzemljenja] R_i, a ne otpor rasprostiranja [uzemljenja] R_r. Pod udarnim otporom rasprostiranja [uzemljenja] podrazumijevamo otpor uzemljenja prema impulsnoj struji munje te ga nazivamo i [impulsni otpor uzemljenja] R_i.

3.612 Udarni otpor rasprostiranja [uzemljenja] R_i određuje se približno iz dimenzija uzemljivača i njegova otpora rasprostiranja R_r, [uzemljenja, R_z] na sljedeći način:

3.613 Za nerazgranati vodoravni uzemljivač priključen na njegovu kraju vrijedi približno: $R_i = \alpha_i \cdot R_r$ (Ω), [$R_i = \alpha_i \cdot R_z$], ali za udarnu struju groma praktično efikasna je samo duljina od 20 m od ulaza uzemljivača u zemlju.
Vrijednost koeficijenta α_i ovisi o duljini uzemljivača »l« (m), specifičnom otporu zemlje ρ_z (Ωm), a određuje se prema tablici P3–2.

3.614 Za uspravne uzemljivače i skupine takvih uzemljivača kod kojih međusobni razmak pojedinih uzemljivača nije veći od 5 m, uzima se $\alpha_i = 1$.

[**Tablica P3–2.** Koeficijent α_i za različite duljine i specifični otpor tla ρ_z trakastog uzemljivača.]

Duljina uzemljivača l, m	Specifični otpor zemlje ρ_z, Ωm				
	50	100	150	200	250 i više
do 20	2,0	1,0	*	*	*
> 20 do 30	3,0	1,5	1,0	*	*
> 30 do 40	4,0	2,0	1,3	1,0	*
> 40 do 50	5,0	2,5	1,7	1,3	1,0

* Duljina nedovoljna

3.615 Pojedinačna ploča za uzemljenje ima otpor rasprostiranja [uzemljenja] približno

$$\left[R_z \equiv R_r = \frac{\rho_z}{4{,}5a} \quad (\Omega)\right]$$

ako je a strana kvadrata (ploče) u metrima.
Tako je npr. za ploču od 0,5 m^2 otpor rasprostiranja [uzemljenja]: $R_z \equiv R_r = 0{,}35\rho_z$, a za ploču od 1 m^2

$$\left[R_z \equiv R_r = 0{,}25\rho_z\right]$$

3.62 Za specifični otpor zemlje manji od 250 Ω, udarni ili [impulsni otpor uzemljenja] R_i uzemljivača smije iznositi najviše 20 Ω ako tim propisima za pojedine slučajeve nisu dane druge vrijednosti.

3.621 Ako je specifični otpor zemlje veći od 250 Ω, [impulsni otpor uzemljenja] R_i ne smije biti brojno veći od 8 % od izmjerenog specifičnog otpora tla u Ωm.

3.63 Konstrukcija i smještaj uzemljivača moraju biti odabrani tako da otpor rasprostiranja R_r [uzemljenja, R_z], a time i udarni ili impulsni otpor R_i budu što manji. Kao uzemljivači mogu poslužiti:

3.631 Specijalno za tu svrhu u zemlju položeni vodovi u obliku:
a) vodoravno položenih žica i traka (trakasti uzemljivači)
b) uspravnih cijevi ili profila (štapni uzemljivači)
c) uspravnih ploča (pločasti uzemljivači).

3.632 metalne konstrukcije i mreže cijevi u zemlji, s iznimkom onih navedenih u toč. 3.682 i 3.684 ovih propisa.

3.64 Trakasti uzemljivači izrađuju se od pocinčanog čelika s dimenzijama po točki 3.21 ovih propisa. Polažu se što dalje od temelja zgrade, po pravilu na udaljenosti od 2 m, i to kao pojedinačni vodovi duž zgrade, kao zatvoreni prstenasti uzemljivači oko zgrade ili kao zvjezdasti uzemljivači kod kojih više pojedinačnih vodova izlazi iz jedne točke raznim smjerovima pri čemu kut između dvaju susjednih vodova treba biti najmanje 60°.
Dubina polaganja mora iznositi najmanje 0,5 m, ali se preporučuje da iznosi 0,8 m.

3.65 Štapni uzemljivači izrađuju se od pocinčanih čeličnih cijevi odgovarajuće debljine i duljine, a u skladu s propračunom koji zadovoljava uvjete iz toč. 3.62 i 3.621 ovih propisa.

Najmanji je dopušteni unutarnji promjer cijevi 38 mm. Preporučuju se plinske cijevi od Ø50 mm. Umjesto cijevi mogu se upotrijebiti i čelični ravnokratki kutnici 65 × 65 × 7 ili drugi ekvivalentni profili.

Duljina uzemljivača iznosi najmanje 3 m.

Pri uporabi većeg broja štapnih uzemljivača, njihova međusobna udaljenost treba biti bar jednaka duljini uzemljivača.

3.66 Pločasti uzemljivači obično su kvadratnog oblika, i to od pocinčanog čelika s površinom ploče (s jedne strane) najmanje 0,5 m^2 i debljinom od 3 mm, ili od bakra debljine 2 mm.

Ploče se polažu uspravno u zemlju, tako da je gornji rub ploče najmanje 1 m duboko u zemlji. Takvi uzemljivači mogu se primijeniti samo na mjestima gdje razina podzemne vode dopire u dubinu najmanje 3 m od površine.

Pločasti uzemljivači ne preporučuju se za gromobrane.

3.67 Ako je zemlja u okolini zaštićenog objekta električno nehomogena, tj. nema isti specifični otpor, uzemljivače treba položiti u sloj zemlje s najvećom vodljivošću.

3.671 Ako neki objekt ima više uzemljivača, treba ih međusobno spojiti vodom položenim u zemlju. Pri tome prednost ima polaganje prstenastog voda oko zaštićenog objekta.

3.672 Nije dopušteno zasipati uzemljivače šljakom ili zgurom niti polagati uzemljivače u stalno zagrijavanu zemlju.

3.673 Razmak uzemljivača odnosno odvoda od postojećih podzemnih električnih kabela mora iznositi najmanje 3 m, a ukrštanje treba provoditi pod pravim kutom. Ako se pri ukrštanju ne može održati taj razmak, on se smije smanjiti ako se dovod do uzemljivača izolira zaštitnom cijevi od neprovodljivog i nehidroskopnog materijala (npr. keramičke cijevi). Duljina zaštitnih cijevi mora biti tolika da između kabela koji treba zaštiti i neizoliranog dovoda odnosno uzemljivača ostane razmak od bar 3 m.

3.674 Ako ovi ili drugi propisi to ne zabranjuju, treba s uzemljivačem gromobrana spojiti sve metalne mase u zemlji koje su udaljene manje od 3 m, a po mogućnosti i one udaljene do 20 m. Spajanje se izvodi direktno ili pomoću dopunskog pribora.

3.675 Polaganje uzemljivača iz točke 3.631 ovih propisa iznimno je dopušteno i u vodu, ako ne postoji mogućnost izvođenja isto tako dobrog uzemljenja u zemlji na obali. U tom slučaju, s obzirom na promjene vodostaja i specifičnog otpora vode tijekom godine, treba se pobrinuti da udarni [ili impulsni] otpor R_i pri najnižem vodostaju, kao ni pri najvećem specifičnom otporu vode, ne prekorači najveću dopuštenu vrijednost.

Odvode u vodi treba završiti uspravnim uzemljivačem zabijenim u dno.

Na mjestima gdje su uzemljivači položeni u vodu opasno je zadržavanje po nevremenu, pa na takvim mjestima treba postaviti odgovarajuće natpise koji upozoravaju na to. Postavljanje uzemljivača u bunare nije dopušteno.

3.68 Kao uzemljivači mogu služiti u zemlju položene metalne konstrukcije, metalna vodovodna mreža, a u određenim slučajevima i armiranobetonski temelji zgrade.

3.681 U zemlju položena vodovodna mreža s metalnim cijevima može poslužiti kao uzemljivač, i to najviše u dva odvoda po objektu.

3.682 Vodovodne mreže ne smiju služiti kao uzemljivači:

a) ako postoji mogućnost da s njih dođe do preskoka u unutrašnjost zgrade ili postrojenja ugroženih eksplozijom (tvornice skladišta streljiva)

b) ako je otpor rasprostiranja [uzemljenja R_z] R_r vodovodih cijevi veći od 20 Ω.

3.683 Ako vodovodna mreža služi kao uzemljivač gromobrana, odvod gromobrana treba u prvome redu priključiti na ulaznu cijev prije vodomjera. Ako to nije moguće, treba prema točki 3.752 ovih propisa premostiti sve vodomjere i slične aparate, koji su ugrađeni između mjesta na kojima je priključen gromobranski odvod i podzemnog dijela vodovodne mreže.

3.684 Plinovodi ne smiju služiti kao uzemljivači.

3.685 Ako su vodovi uzemljivača i plinovodi međusobno udaljeni manje od 3 m, treba ih međusobno spojiti. Pri proračunu prelaznog otpora uzemljenja gromobrana, plinovod se ne smije uzeti u račun.

3.686 Ako kod nekih cjevovoda položenih u zemlju postoje uvjeti iz točke 4.67 ovih propisa, uzemljivač mora biti od njih udaljen bar 3 m.

3.687 Za ukrštanje uzemljivača s cjevovodima primjenjuje se odredba točke 4.673 ovih propisa.

3.688 Ako vodovodna mreža služi kao uzemljivač, o tome se mora obavijestiti organizacija vodovoda kojoj pripada ta vodovodna mreža.

3.69 Pojedinačni uzemljivači po pravilu neće se polagati ispod mjesta na kojima se u slučaju oluje mogu skupljati ljudi ili životinje.

Ako se to ne može izbjeći, treba odgovarajućim mjerama spriječiti opasnost zbog napona koraka, koja nastaje pri udaru groma, u smislu *Tehničkih propisa za elektroenergetska postrojenja iznad 1000 V* [Točka P6 priloga].

3.691 Zgrade u kojima se u slučaju oluje mogu skupljati ljudi ili životinje, kao promatrački tornjevi, planinske kuće i slično, trebaju imati jedan ili, još bolje, dva prstenasta uzemljivačka voda na međusobnoj udaljenosti od 2 m, koji su na više mjesta među sobom spojeni.

Zadržavanje na promatračkim tornjevima za vrijeme oluje treba izbjegavati.

P3.3. Metalne mase

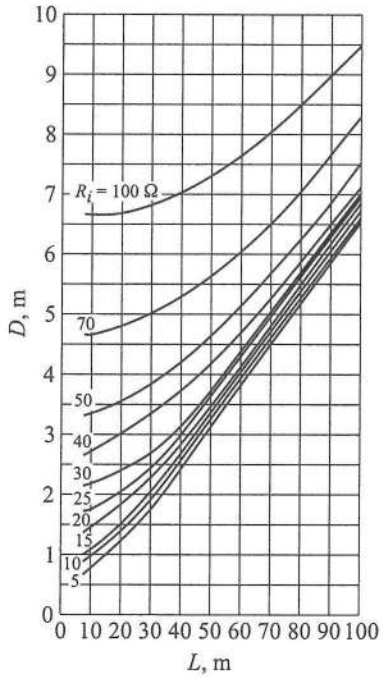
3.72 Metalne mase duže od 2 m ili mase čija je površina veća od 2 m^2 priključuju se na gromobransku instalaciju ako se nalaze u ravnini koja je ograničena zaštitnim kavezom ili ako su izvan kaveza, a stvarni razmak od tih masa do gromobranske instalacije manji je od vrijednosti D u dijagramu na slici P3–1.

3.721 Razmak D (m) ovisi o veličini udarnog ili impulsnog otpora uzemljenja R_i (Ω) i udaljenosti L (m) između mjesta na kome se metalna masa najviše približuje gromobranskoj instalaciji i ulaza odvoda u zemlju (slika P4–1). Razmak D izračunava se po približnoj formuli:

$$D = 0{,}066R + 0{,}028L.$$

3.722 Umjesto formule mogu se upotrijebiti krivulje iz dijagrama na slici P3–1 koje vrijede za zrak.

Ako se u međuprostoru nalazi predmet druge dielektrične čvrstoće (npr. suhi zid), razmak D treba u odgovarajućoj mjeri korigirati.



Sl. P3–1. Potreban razmak metalnih masa od gromobranske instalacije u ovisnosti o udarnom otporu uzemljenja R_i.

3.73 Metalne dijelove električnih aparata i strojeva ispod krova opskrbljene zaštitnim uzemljenjem, koji mogu doći pod napon, kao i metalne mase na koje su ti aparati i strojevi učvršćeni, treba priključiti na gromobran s pomoću dopunskog pribora (točka 3.210).

3.731 U pogledu stvarnog razmaka izmedu dijelova električne i gromobranske instalacije primjenjuje se odredba točke 3.72 ovih propisa. Ako stvarni razmak iz bilo kojih razloga mora biti manji od razmaka »*D*« dobivenog prema dijagramu slike P3–1 treba između dijelova električnih instalacija koje stoje pod naponom i gromobranske instalacije izvesti spoj preko dopunskog pribora.

3.77 Čelične konstrukcije objekata i armature armiranobetonskih objekata treba uzemljiti najmanje na dva mjesta (točke 3.45).

3.78 Veće metalne mase u blizini zaštićenog objekta (čelične ograde, mostovi, nadzemni cjevovodi) treba uzemljiti ako njihov položaj povećava opasnost od udara groma.

P3.4. Električna postrojenja

3.81 Pri postavljanju gromobranske instalacije treba uzeti u obzir blizinu električnih postrojenja toj gromobranskoj instalaciji prema točki 3.7 ovih propisa, kao i blizinu:

a) zgrada u obliku tornja, kao što su: antenski stupovi predajnika, tornjevi bogomolja, promatrački tornjevi, dimnjaci sa električnim reklamnim instalacijama, stupovi za reflektore itd.
b) zgrada ugroženih požarom i eksplozijom.

3.82 Ako se električno postrojenje nalazi ili postavlja blizu gromobranske instalacije, potrebno je:
a) čelične cijevi vodova koje su medusobno provodno spojene i metalne plašteve kabela b) spojiti sa gromobranskim vodovima ili sa metalnom masom spojenom s gromobranskim vodovima, i to na mjestu približavanja i na drugom mjestu najbližem zemlji:
na vodovima sa zaštitnim vodičem zaštitni vodič spojiti s gromobranskim vodovima kao pod a), pod uvjetom da zaštitni vodič ima presjek najmanje 10 mm^2 Cu, 16 mm^2 Al odnosno 50 mm^2 Fe.
Gdje ima više provodnih vodiča, uzima se u obzir zbir njihovih presjeka.

3.821 Zaštitni vodiči za zaštitu s pomoću zaštitne naponske sklopke ne smiju se spominjati s gromobranskim postrojenjem.

3.83 Ako se električna instalacija spaja s gromobranskim postrojenjem, postavljaju se na glavnoj razvodnoj ploči odvodnici prenapona spojeni s uzemljenjem gromobrana.

3.881 Metalne krovne nosače za antene treba uzemljiti odnosno priključiti na gromobransku instalaciju.

3.89 Metalne nosače telekomunikacijskih vodova na zaštićenim objektima treba priključiti na gromobransku instalaciju najkraćim putem s pomoću vodiča u smislu točke 3.21 ovih propisa, ako je to iz pogonskih razloga dopušteno.

P3.5. Povezivanje s drugim uzemljenjima

3.91 Uzemljenje gromobranske instalacije i pogonska kao i zaštitna uzemljenja niskonaponskih elektroenergetskih postrojenja i instalacija, po pravilu, se međusobno povezuju, osim u određenim slučajevima kad je to zabranjeno propisima.

3.92 Isto tako, gromobranska se instalacija povezuje s pogonskim kao i zaštitnim uzemljenjem visokonaponskih postrojenja, ako ispunjava uvjete za to uzemljenje u pogledu napona dodira i napona koraka.

3.93 Povezivanje uzemljenja gromobranske instalacije s uzemljenjima telekomunikacijskih instalacija provodi se u skladu s propisima o telekomunikacijskim instalacijama.

P3.6. Posebne odredbe o gromobranima na specifičnim objektima koje se odnose na uzemljenja

P3.6.1. Nemetalni tornjevi, silosi i tvornički dimnjaci viši od 10 m

Svaki odvod na tornjevima mora imati svoj uzemljivač, a svi uzemljivači moraju biti međusobno spojeni podzemnim prstenastim vodom, koji po mogućnosti treba priključiti na uzemljivače susjednih gromobrana.
Uzemljivač i podzemni prstenasti vodovi moraju biti položeni što dalje od podzemnih dimnih kanala.
Na uzemljivače gromobrana treba priključiti uzemljivače susjednih gromobrana i uzemljenje metalne mase, po mogućnosti sve do udaljenosti od 20 m.

Metalnu užad za usidrenje (ankerovanje) objekata treba uzemljiti na mjestima njihova učvršćenja.
Ovakvo uzemljenje treba provoditi prema točki 3.65 ovih propisa, s tim što je dovoljno upotrijebiti štapni uzemljivač duljine 2 m.

P3.6.2. Pogonske prostorije i skladišta eksploziva

Uzemljenje se izvodi prema točki 3.6 ovih propisa.
Ako su stupovi s hvataljkama postavljeni na nasip, treba jedan prstenasti vod položiti u nasip, a drugi izvan nasipa, s njegove vanjske strane.
Oba prstenasta voda treba povezati međusobno u produženju svih odvoda, ali najmanje četiri puta.
S unutarnje strane nasipa treba položiti još jedan prstenasti vod (unutrašnji), a u zemlji ga spojiti s vanjskim prstenastim vodom najmanje na dva mjesta. Ako nasip obuhvaća više objekata, prstenasti zemljovod treba položiti oko svih tih objekata.
Ukupni otpor uzemljenja jednog objekta ili skupine objekata ne smije biti veći od 10 Ω.
Ako se taj otpor ne može postići samo prstenastim vodovima, zbog kratkog voda ili zbog loše provodnosti zemlje treba dodati još i druge uzemljivače. Provodne (metalne) podove u objektu treba spojiti na više mjesta s unutrašnjim prstenastim vodom, i to po mogućnosti simetrično. Dopušten je i njihov priključak na sabirni vod u objektu.
Na mjestu priključka poda na unutarnji prstenasti zemljovod treba postaviti još i poseban uzemljivač.
Uzemljenja susjednih objekata na udaljenosti do 20 m od zaštićenog objekta treba podzemno spojiti s uzemljenjem tog objekta.
Za ispitivanja i mjerenja treba u priključnim vodovima, u spojenim vodovima između prstenastih vodova i u priključnim vodovima susjednih uzemljenja ugraditi rastavne spojnice i označiti ih tablicama.
Metalna kućišta većih električnih aparata treba priključiti na sabirni vod u objektu ili neposredno na unutarnji prstenasti zemljovod.
Metalna kućišta malih električnih naprava, kao što su svjetiljke, sklopke i priključnice, treba spojiti sa zemljovodima ako su od njih udaljena do 0,5 m.
Za spajanje treba primijeniti bakrenu žicu presjeka najmanje 10 mm^2.
Dimnjaci, tornjevi, visoki predmeti, visoko drveće i uzvišenja udaljeni manje od 100 m od zaštićenog objekta s eksplozivnim sadržajem, moraju imati propisne gromobrane.
Željezničke tračnice i nadzemne cjevovode koji ulaze u zaštićeni objekt, treba najkraćim putem spojiti na prstenasti uzemljivač objekta. Na ulazu u zaštićeni objekt željeznički kolosijek treba izolirati s pomoću izolacijskih umetaka između tračnica.
Osim toga, treba na udaljenostima od 15, 25 i 50 m od prstenastog zemljovoda objekta, nadzemne cjevovode uzemljiti štapnim uzemljivačima (točka 3.65) duljine najmanje 4 m.

P3.6.3. Pogonske prostorije i skladišta ugrožena eksplozijom

Posebno uzemljenje posuda nije potrebno ako su spojene s uzemljenim cjevovodima, ili ako su posude postavljene bez izolacijske podloge na zemlju ili beton. Inače posude treba uzemljiti s pomoću prstenastih vodova ili priključiti na sabirni zemljovod.
Uzemljivače ili veće metalne mase na udaljenosti od 10 m od tih odvoda, treba povezati s njima odnosno s njihovim uzemljenjem.

Na postrojenja za punjenje cisterni (kamioni, vagoni, brodovi) cjevovode treba uzemljiti kao glavne odvode i s njima spojiti sve metalne mase u blizini, kao što su željezničke tračnice i metalne konstrukcije.

P4. Izvod iz *Pravilnika o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja iz područja zaštite od prenapona* (Sl. list br. 19/68, Narodne novine br. 53/91)

P4.1. Zaštita od prenapona

4.85 Da bi se u direktno uzemljenim visokonaponskim mrežama smanjile eventualne prevelike struje zemljospoja, pojedina direktna uzemljenja nultih točaka transformatora mogu se isključiti. Isključenja treba provesti na osnovi dokumentirane analize, s tim da ostanu uvjeti za direktno uzemljenje mreže. Istodobno treba voditi računa da se pri eventualnom isključenju jednog dijela mreže ne dobije u preostalom dijelu mreže nedovoljno uzemljene zbog toga što su neke nulte točke isključene zbog smanjenja struje zemljospoja, a što bi imalo za posljedicu nedopuštene prenapone pri zemljospoju.

4.86 Pogon mreže s izoliranom nultom točkom može se odvijati ako kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} te mreže nije suviše velika. Preporučuje se da kapacitivna struja zemljospoja ne prijeđe sljedeće vrijednosti:

Nazivni napon mreže, kV	Kapacitativna struja zemljospoja, kV
6	30
10	20
20	15
35 i više	10

Ako kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} prijeđe navedene vrijednosti, treba mrežu razdvojiti ili primijeniti uzemljenje nulte točke da bi se spriječile prenaponske pojave pri zemljospoju.

4.87 Sve kvarove i isključenja zbog prenapona treba proučiti da bi se spriječile posljedice.

4.88 Povremeno treba pregledavati uzemljenja postrojenja i ispravnost spojeva odvodnika prenapona sa sustavom uzemljenja.

P5. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu od statičkog elektriciteta, za područje uzemljenja (Sl. list br. 62/73, Narodne novine br. 53/91)

P5.1. Opće odredbe

Članak 2.

Odredbe ovog pravilnika ne primjenjuju se u proizvodnim procesima u kojima se statički elektricitet industrijski koristi (npr. za čišćenje plinova, za rastavljanje sitnozrnatih materi-

jala, u elektrostatičkim uređajima za prenošenje premaza i sl.) a pritom ne postoji opasnost od eksplozivnih smjesa.

Članak 21.

Galvanska je veza električna veza između pojedinih dijelova postrojenja, i to kako međusobno tako i između postrojenja i zemlje (uzemljenje).

Članak 22.

Otpor je uzemljenja zbroj otpora uzemljivača i otpornosti zemljovoda.

P5.2. Potrebne zaštitne mjere

Članak 29.

Skupljanje statičkog elektriciteta u proizvodnim procesima sprečava se:

1) uzemljenjem
2) održavanjem odgovarajuće vlage u zraku
3) ionizacijom zraka
4) antistatičkom pripremom
5) povećanjem vodljivosti loše provodljivih materijala
6) odvođenjem statičkog elektriciteta influencom.

Članak 30.

Uzemljenje se mora primjenjivati na svim vodljivim dijelovima strojeva, bez obzira na to upotrebljavaju li se i druge mjere zaštite od statičkog elektriciteta.

Članak 31.

Uzemljenje se izvodi galvanskim vezivanjem svih vodljivih dijelova postrojenja na uzemljivač.

Članak 32.

Presjek fiksno položenog bakrenog vodiča s obzirom na mehaničku čvrstoću ne smije biti manji od 4 mm^2. Umjesto bakrenih vodiča može se upotrijebiti čelična pocinčana traka najmanjeg presjeka 20 × 3 mm. Za fleksibilne vodove i spojeve treba se koristiti bakrenim užetom presjeka 10 mm^2.

Članak 33.

Kao uzemljivači mogu se upotrijebiti svi tipovi predviđeni odredbama pravilnika o tehničkim propisima o gromobranima, odnosno priključak postrojenja na postojeći sustav zaštitnog uzemljenja.

Članak 34.

Otpornost sustava uzemljenja za odvođenje statičkog elektriciteta mora biti u granicama određenim u toč. 3.62 i 3.621 *Tehničkih propisa o gromobranima*.

Članak 35.

S mjesta koncentracije statičkog elektriciteta, postrojenje se mora povezati najkraćim putem na sustav uzemljenja.

Članak 36.

Pokretni dijelovi postrojenja, preko bakrenih, brončanih ili ugljenih četkica, priključuju se na sustav uzemljenja. Četkice moraju biti uspravno i fiksno postavljene na rotirajuću osovinu s pritiskom na površinu od 0,1 do 0,2 kp/cm^2. Obrtni dijelovi između ležišta i osovine kod maloga procjepa i odgovarajućeg maziva mogu ispuniti uvjete u pogledu otpornosti uzemljenja.

P5.3. Proizvodnja privrednih eksploziva u prahu

Članak 59.

Sva postrojenja za proizvodnju privrednih eksploziva u prahu moraju biti zaštićena od statičkog elektriciteta uzemljenjem suglasno s čl. od 30. do 36. ovog pravilnika.

Članak 61.

Svi automatski ili poluautomatski strojevi za izradu patrona moraju biti uzemljenji. Transmisijske trake moraju biti od provodljive gume i uzemljene.

P5.4. Proizvodnja nitroceluloznog baruta

Članak 64.

Hidraulička preša u kojoj se proizvodi nitrocelulozni barut, komore u kojima se suše barutne trake i uređaji za sječenje i prosijavanje baruta moraju se povezati na sustav uzemljenja prema čl. od 30. do 36. ovog pravilnika.
Pare iz komora u kojima se suši barutna traka i zrak odvode se sustavom ventilacije. Ventilatori se moraju uzemljiti preko obrtne osovine.
Radi izbjegavanja punjenja statičkim elektricitetom barutnih zrna pri istresanju, svi okviri moraju biti uzemljeni, a istodobno treba održavati relativnu vlažnost zraka u sušnici.

Članak 65.

Radi sprečavanja akumulacije statičkog elektriciteta u barutu pri sušenju, sve etaže i okviri u sušnici moraju biti povezani na sustav uzemljenja.
Bubanj u kome se polijeva barut, mješalica i vibraciona sita moraju biti uzemljeni.

Članak 66.

Sve posude za vrijeme punjenja barutom moraju se nalaziti na vodljivom podu odnosno na uzemljenom stolu koji je prekriven vodljivom gumom.

P5.5. Proizvodnja crnog baruta

Članak 67.

Čelični cilindri koji se okreću oko svoje vodoravne osi, vibracijsko sito koje se nalazi direktno ispod cilindra, drvena sita u kojima se barut prosijava i sušnice za sušenje baruta moraju biti uzemljeni.
Drobilica se uzemljuje preko dna ili preko pokretnih valjaka.

Članak 68.

Kroz bubanj se mora postaviti vodič za uzemljenje da bi se odveo statički elektricitet koji se može skupiti zbog međusobnog trenja barutnih zrnaca.

P5.6. Proizvodnja inicijalnih eksploziva

Članak 69.

Pri proizvodnji živinog fulminata u procesu sušenja može se pojaviti statički elektricitet. Živin fulminat poslije cijeđenja sadrži 10 % vlage, koja se odvodi u sušnice toplim zrakom temperature do 35 °C.
Sušnice u kojima se suši živin fulminat moraju biti uzemljene prema čl. 30. do 36. ovog pravilnika.
Svi okviri metalne sušnice moraju biti povezani na sustav uzemljenja. Podovi sušnice moraju biti izrađeni od provodljive gume prema članku 37. ovog pravilnika. Prije početka pražnjenja sušnice u prostoriju se mora uvesti vlažan zrak prema članku 40. ovog pravilnika.

Članak 70.

Uređaji za prosijavanje olovnog azida moraju biti povezani na sustav uzemljenja. Podovi u prostoriji moraju biti od provodljive gume.
Sva se uzemljenja moraju pregledavati svakih 7 dana.

P5.7. Manipulacije s privrednim eksplozivima, sportskim i lovačkim streljivom; prijevoz i skladištenje takvih eksploziva i streljiva

Članak 80.

Prijevoz privrednih eksploziva i lovačkog i sportskog streljiva željeznicom stvara neznatnu opasnost od statičkog elektriciteta, ali se ipak vagoni pri ulasku u opasnu zonu ili krug skladišta moraju uzemljiti s pomoću stezaljki koje su spojene sa zemljovodnim vodičima i sustavom uzemljenja

Članak 81.

Prijevoz vozilima s gumenom pneumatikom stvara vrlo povoljne uvjete za pojavu statičkog elektriciteta.
Pri prijevozu vozilima tekućih eksplozivnih materijala mogu se pojaviti iskre. Radi sprečavanja pojave statičkog elektriciteta vozila moraju biti uzemljena prema članku 85. ovog pravilnika.

P5.8. Zapaljive i loše provodljive tekućine

Članak 85.

Autocisterne s čeličnim spremnikom i čeličnom konstrukcijom, a s gumenim pneumaticima moraju biti povezane na uzemljenje s krajnje osovine s pomoću provodljive upletene

trake u gumi, koja se za vrijeme prijevoza stalno vuče po površini puta i na taj način ima ulogu pomoćnog uzemljivača. Svi metalni dijelovi autocisterni moraju međusobno biti galvanski povezani u jednopotencijalni sustav.

Članak 86.

Radi sprečavanja skupljanja statičkog elektriciteta pri punjenju odnosno pražnjenju cisterne, dovodne cijevi moraju se uzemljiti prema čl. od 30. do 36. i članku 85. ovog pravilnika. Na kraju kabela koji služi za uzemljenje mora se postaviti izolirana ručica s ugrađenim prekidačem, čiji se nepokretni dio spaja s pokretnim dijelom tek pošto se priključi kabel na cisternu.
Prekidač i utikač za kabel iz stavka 1. ovog članka moraju biti u »S« izvedbi [protueksplozivnoj izvedbi], i to tipa (St) II A T3.

Članak 87.

Ako spojnice cijevi ne garantiraju sigurnost galvanske veze, moraju se premostiti kabelskim stopicama i savitljivim bakrenim užetom čiji je presjek najmanje 10 mm^2.

Članak 88.

Sve veze i spojeve treba prethodno pregledati i tek ako su oni pravilno uključeni i uzemljeni može se pristupiti punjenju odnosno pražnjenju cisterne. Cijev za punjenje treba utopiti u cisternu tako da ona bude najmanje 50 mm udaljena od dna cisterne.

Članak 91.

Tekućina u cisterni sa spremnikom od plastičnog materijala zbog kretanja prikuplja statički elektricitet za koji, poslije galvanskog povezivanja i uzemljenja, treba omogućiti pražnjenje.
Od trenutka uključenja na sustav uzemljenja mora se čekati najmanje 15 minuta prije početka pražnjenja ili punjenja cisterne, odnosno osigurati brzo pražnjenje cisterne s instalacijom s više priključaka za pražnjenje.

Članak 92.

Na vagonskim cisternama, pored predviđenih zaštitnih mjera propisanih za autocisterne (članak 86.), moraju se pri punjenju odnosno pražnjenju povezati i kotači vagonskih cisterni na sustav uzemljenja.
Željezničke tračnice moraju se dodatno uzemljiti. Dodatno uzemljenje vrijedi naročito za elektrificirane pruge koje treba na stanici za punjenje ili pražnjenje električno izolirati od glavne pruge.

Članak 93.

Prijenosne posude i bačve sa zapaljivom i loše provodljivom tekućinom moraju se galvanski povezati i uzemljiti na mjestu punjenja ili pražnjenja zajedno sa posudama koje se pune tekućinom ili se prazne.

Članak 94.

Posude sa zapaljivom ili loše vodljivom tekućinom, a posebno mješalice i autoklavi, moraju se međusobno povezati i s cijevima galvanski spojiti na sustav uzemljenja.

P5.9. Ispuštanje komprimiranog zraka, plinova i para, kao i prskanje raznim sredstvima

Članak 97.

Statički elektricitet se pojavljuje i na površini tijela na koje udara mlaz komprimiranog zraka, plina ili pare. Statički elektricitet se stvara i pri ispuštanju plinova iz spremnika i cijevi. Prskanjem bojom, lakom i sličnim sredstvima proizvodi se manja količina statičkog elektriciteta, ali se ipak mora primijeniti galvansko povezivanje svih metalnih dijelova na sustav uzemljenja, ako se u okolnoj atmosferi mogu pojaviti eksplozivne smjese.

Članak 103.

Statički elektricitet se pojavljuje posebno između papira i tiskarskog stroja; a posebno dolazi do izražaja kod rotacijskih strojeva zbog brzog kretanja papira. Pri galvanskom povezivanju na sustav uzemljenja kod tiskarskih strojeva moraju se povezati i obrtni dijelovi odnosno svi pokretni dijelovi strojeva.

P5.10. Industrija prirodne i sintetičke gume

Članak 106.

Pored mjera iz članka 29. ovog pravilnika, moraju se poduzeti i sljedeće zaštitne mjere:

1) galvanski povezati i uzemljiti ne samo kostur stroja, nego i sve pomoćne valjke i miješalice, kao i posudu za pripremu gumene smjese
2) odvoditi statički elektricitet s pomoću uzemljenih bodljikavih odvodnika odnosno bakrenih lančića pričvršenih na razmacima od po 50 mm na uzemljenim bakrenim šipkama
3) povećati vodljivost gumenog materijala ako to dopuštaju tehnička svojstva proizvoda, a to se postiže dodavanjem na primjer 3 % etilnog alkohola ili 0,1 % octene kiseline ili 0,01 % magnezijskog oleata.

P5.11. Transmisije

Članak 113.

Pri prijenosu pokretanja remenjem stvara se statički elektricitet zbog međusobnog trenja, savijanja i trenja sa zrakom.

Članak 114.

Na odvođenje statičkog elektriciteta s remena na transmisije treba primijeniti sljedeće mjere:

1) galvanski povezati i uzemljiti sve metalne dijelove transmisije
2) odvoditi statički elektricitet influencom, s tim da se zaštitne mjere zbog eventualnog iskrenja na metalnim šiljcima češljeva ili bodljikavih odvodnika ne smiju primijeniti u prostorijama u kojima se može pojaviti eksplozivna smjesa

3) preparirati površine remena antistatičkim sredstvima radi povećanja površinske provodljivosti
4) povećati specifičnu provodljivost neprovodljivih remenova dodavanjem provodljivih materijala.

P5.12. Strojevi za mljevenja; prijenosna i razna druga postrojenja

Članak 115.

Strojevi za mljevenje i drobljenje određene sirovine koje zbog toga primaju svojstva neprovodljivog materijala i time postaju nosioci statičkog elektriciteta, moraju biti uzemljeni u skladu s čl. od 30. do 36. ovog pravilnika.

Članak 117.

Kao zaštitne mjere treba primijeniti, pored galvanskog spajanja svih provodljivih dijelova i njihova zajedničkog uzemljenja, i održavanje relativne vlažnosti zraka od 70 %, u skladu s čl. od 30. do 36. i članku 40. ovog pravilnika.
Pri prijevozu higroskopnog materijala ne postoji, po pravilu, opasnost od statičkog elektriciteta. Zbog toga treba, ovisno o brzini kretanja prašinastih čestica, na početku proizvodnje ispitati jesu li potrebne mjere zaštite od statičkog elektriciteta. Jedna je od mjera za sprečavanje pojave statičkog elektriciteta kod prašinastih materija smanjenje brzine kretanja.

P5.13. Statički elektricitet ljudskog tijela i odjeće i obuće

Članak 118.

Svim osobama koje bi mogle pokupiti s bilo kojeg dijela tijela statički elektricitet treba zabraniti ulaz u pogone u kojima postoji opasnost od eksplozivnih smjesa, eksplozivnih materijala i streljiva, ako nisu prethodno oslobođena od statičkog elektriciteta. To se može postići obvezatnim pražnjenjem s pomoću uzemljenih vrata prije ulaženja u ugroženu prostoriju.

Članak 127.

Mjerenje otpornosti sustava uzemljenja treba provoditi najmanje dva puta godišnje, a kontrolno mjerenje pri svakom čišćenju odnosno remontu postrojenja.

P6. Izvod iz Pravilnika o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, za područje uzemljenja (Sl. list br. 4/74 i 13/78, Narodne novine br. 53/91)

P6.1. Opće odredbe

Članak 1.

Ovim pravilnikom reguliraju se tehnički normativi koji se moraju primjenjivati pri izgradnji i rekonstrukciji elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V između bilo kojih dijelova u postrojenju (u daljem tekstu: postrojenje).

Na elektroenergetska postrojenja u podzemnim rudnicima, u elektrokemijskoj industriji, na nadzemnim mjestima ugroženim od eksplozivnih smjesa i na električnim željeznicama, uključujući i uređaje na vozilima i kontaktne vodove, kao i na elektroenergetska postrojenja za posebne namjene (kao što su postrojenja za napajanje antenskih uređaja na planinskim vrhovima, postrojenja elektrofiltera i sl.) primjenjivat će se posebni propisi.

P6.2. Uzemljivači i uzemljenje

Članak 66.

Srednje vrijednosti specifičnog otpora tla ρ_z za razne vrste zemlje dane su u tablici P6–1. kao orijentacijske vrijednosti.

Članak 67.

Otpor rasprostiranja ovisi o vrsti i svojstvima zemlje (specifičnom otporu) i o dimenzijama i rasporedu uzemljivača.

Tablica P6–1. Specifični otpor tla za različita tla.

Vrsta zemlje	Specifični otpor ρ_z, Ωm
Močvara	30
Glina, ilovača, ziratna zemlja	100
Vlažni pijesak	200
Vlažni šljunak	500
Suhi pijesak ili suhi šljunak	1000
Kamenito tlo (stijena)	3000

Srednje vrijednosti otpora rasprostiranja* dane su u tablici P6–2. za specifični otpor zemlje $\rho_z = 100$ Ωm.

Tablica P6–2. Otpor rasprostiranja R_r (uzemljenja) za različite vrste uzemljivača pri specifičnom otporu tla $\rho_z = 100$ Ωm.

Vrsta uzemljivača	Trakasti duljine l, m				Štapni duljine l, m				Pločasti zakopan 1 m ispod zemlje, m	
	10	25	50	100	1	2	3	5	0,5 × 1	1 × 1
Otpor rasprostiranja (uzemljenja) $R_r \equiv R_z$, Ω	20	10	5	3	70	40	30	20	35	25

Za drugi specifični otpor zemlje ρ_{z1} navedene vrijednosti otpora množe se odnosom $\rho_{z1}/100$.

* Srednja vrijednost otpora rasprostiranja izjednačuje se s otporom uzemljenja $R_r = R_z$ (prim. autora).

P6.3. Materijal i dimenzije uzemljivača

Članak 68.

Kao materijal za uzemljivače treba upotrebljavati čelik pocinčan toplim postupkom ili na koji drugi način zaštićen od korozije, ako lokalne prilike ne zahtijevaju uporabu kojega drugog materijala (npr. bakra).
Za uzemljivače se ne preporučuje uporaba nepocinčanih čeličnih cijevi, lima i profila. Lake se kovine u pravilu ne mogu upotrebljavati za uzemljivače (članak 77).

Članak 69.

Najmanji presjeci uzemljivača dani su u tablici P6–3.
Presjeke dane u ovoj tablici nije dopušteno umanjiti zbog korozije i strujnog opterećenja. Uzemljivači u obliku pletene mreže što služe samo za oblikovanje potencijala moraju biti od žice presjeka najmanje 16 mm^2 ako su od pocinčanog čelika, a 10 mm^2 ako su bakreni.

Tablica P6–3. Najmanji presjeci uzemljivača.

Uzemljivači	Pocinčani čelik	Bakar
Trakasti	Traka 100 mm^2, ali ne tanja od 3,5 mm	50 mm^2, ali ne tanja od 2 mm
	Okrugli čelik Ø 10 mm	Uže od 35 mm^2
Šipkasti	Cijev od 38 mm	Cijev od 30/25 mm
	Kutnik 65 × 65 × 7 mm	–
	Profil U 6 1/2 odnosno T6 ili koji drugi odgovarajući profil	
Pločasti	Lim od 3 mm	Lim od 2 mm

Ako se na određenome području očekuje jača korozija ili se upotrijebe nepocinčane čelične cijevi, lim ili profil, preporučuje se da se uzmu za oko 50 % veće vrijednosti od vrijednosti navedenih u tablici P6–3.

P6.4. Raspored i izvođenje uzemljivača

Članak 70.

Izbor i raspored uzemljivača obavlja se ovisno o mjesnim prilikama, svojstvima i sastavu zemlje, dopuštenom otporu rasprostiranja [(uzemljenja)] i naponu koraka.
Pri uzemljenju stupova u blizini postrojenja istosmjerne struje ili željeznica s istosmjernom strujom, treba spriječiti mogući prijelaz lutajućih struja.

Članak 71.

Uzemljivač mora biti u tijesnoj vezi s okolnom zemljom. U prvome redu treba upotrebljavati slojeve zemlje s dobrom vodljivošću. Ako je zemlja suha, treba oko uzemljivača nabi-

ti dobro nakvašenu i prilijepljenu zemlju. Kamenje i krupan šljunak neposredno uz uzemljivač povećavaju otpor rasprostiranja [(uzemljenja)]. Kod trakastih i štapnih uzemljivača otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] ovisi uglavnom o duljini, a manje o presjeku uzemljivača.

Članak 72.

Trakaste uzemljivače treba polagati na dubinu od 0,5 do 1 m, ako to sastav zemlje dopušta, pritom treba voditi računa o ovisnosti otpora rasprostiranja [(uzemljenja)], o vlažnosti i o zaleđivanju gornjih slojeva zemlje.
Duljine trakastih uzemljivača uzimaju se iz tablice P10–2. iz članka 67. ovog pravilnika, ovisno o otporu rasprostiranja [(uzemljenja)]. Vrijednosti u tablici P10–2. odnose se na ispruženo položene trakaste uzemljivače [pri čemu se postiže najmanji otpor rasprostiranja (uzemljenja)]. Pri drugoj vrsti polaganja, npr. cik-cak, [valovito, zrakasto], trakasti uzemljivači imaju veći otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] za iste dužine trake, [te treba uzeti u obzir korekcijski faktor].
Pri zrakastom rasporedu trakastih uzemljivača, kutovi između pojedinih krakova trebaju biti što ravnomjerniji, a kut između susjednih krakova ne treba biti manji od 60°. Manji kut uz veći broj krakova ne smanjuje bitno otpor rasprostiranja [(uzemljenja)].

Članak 73.

Štapne uzemljivače treba zabiti u zemlju, po mogućnosti uspravno. Njihova duljina uzima se ovisno o otporu rasprostiranja [(uzemljenja)].
Ako treba rasporediti više štapnih uzemljivača da bi se postigao dovoljno nizak otpor rasprostiranja [(uzemljenja)], njihova međusobna udaljenost treba biti jednaka ili veća od dvostruke duljine pojedinog uzemljivača.
U sasušenom i zaleđenom gornjem sloju zemlje, kad ne djeluje čitava duljina štapnog uzemljivača, međusobna udaljenost treba biti jednaka ili veća od dvostruke duljine radnog dijela štapa.

Članak 74.

Pločaste uzemljivače treba postaviti uspravno u zemlju. Površine takvih uzemljivača uzimaju se iz tablice P6–2. iz članka 67. ovog pravilnika, ovisno o otporu rasprostiranja [(uzemljenja)]. Gornja granica ploče treba biti najmanje 1 m ispod površine zemlje. Ako ima više ploča, preporučuje se da se one rasporede tako da njihova međusobna udaljenost iznosi najmanje 3 m.

P6.5. Izvođenje zemljovoda

Članak 75.

Zemljovode treba polagati iznad zemlje tako da budu vidljivi, a ako se prekrivaju, trebaju biti pristupačni i zaštićeni od eventualnih mehaničkih i kemijskih oštećenja.
Pri vođenju kroz tavanicu i zidove, zemljovod treba slobodno položiti (ne uzidavati).
U zemljovode i sabirne zemljovode, koji služe za zaštitno uzemljenje, ne dopušta se ugrađivanje prekidača, rastavljača i sličnih naprava kojima bi se mogao prekinuti zemljovod bez uporabe alata.

Odredba stavka 1. ovog članka ne odnosi se na gole zemljovode koji se mogu položiti u odgovarajući beton tako da su zaštićeni od korozije.

Članak 76.

Najmanji su dopušteni presjeci za zemljovode: 50 mm^2 za čelik pocinčan toplim postupkom, 35 mm^2 za aluminij, a 16 mm^2 za bakar.
U mrežama s efikasno uzemljenom neutralnom točkom, najmanji presjek mora odgovarati očekivanoj struji dozemnog kratkog spoja. Vodiči do uzemljivača koji su goli položeni u zemlju dimenzioniraju se prema tablici P6–3. iz članka 69. ovog pravilnika, jer se smatraju uzemljivačem.

Članak 77.

Orijentacijske vrijednosti za strujno opterećenje raznih presjeka vodiča za uzemljenje dane su u tablici P6–4.

Tablica P6–4. Vrijednost za strujno opterećenje vodiča u sustavima uzemljenja (za graničnu temperaturu 150 °C).

Presjek mm^2	Najveća dopuštena trajna struja, A			Najveća dopuštena struja u trajanju od 1 sekunde, A		
	Čelik	Al	Cu	Čelik	Al	Cu
16	–	–	150	–	–	2500
25	–	–	200	–	–	4000
35	–	–	280	–	3700	5500
50	150*	250*	480*	3300	5300	8000
70	180*	320*	590*	4700	7400	11500
100	240*	430*	780*	6700	10500	16000
200	420*	760*	1380*	13500	21000	32500

* Vrijedi samo za trakaste vodiče.

Vrijednosti za najveću dopuštenu trajnu struju iz tablice P6–4. mogu se povećati za 20 %, ako ne postoji opasnost od požara. Polaganje aluminija u zemlju nije dopušteno, osim ako se na nekom tlu zbog djelovanja korozije pokaže njegova prednost u odnosu na čelik ili bakar.

Članak 78.

Sabirni zemljovodi dimenzioniraju se prema jačini struje koja se očekuje u postrojenju pri dvostrukom zemljospoju ili dozemnom kratkom spoju, pri čemu presjeci ne smiju biti manji od onih koji su navedeni u članku 76. ovog pravilnika.

Članak 79.

Spojeve između zemljovoda i sabirnih zemljovoda, kao i njihove ogranke, treba izvesti tako da se trajno osigura dobra provodna veza. Dopušteni su spojevi ostvareni zavariva-

njem, vijcima ili vijčanim spojnicama. Za užad dopuštene su i cijevne spojnice (zarezne, sa zakovicama i s vijcima).
Spojnice i vijci moraju biti zaštićeni od korozije.

Članak 80.

Radi mjerenja otpora rasprostiranja [(uzemljenja)] uzemljivača, skupine uzemljivača ili cjelokupnog sustava uzemljenja, treba na lako pristupačnom mjestu ugraditi rastavnu spojnicu.
Priključak na uzemljivaču treba biti u mehaničkom pogledu otporan, a u električnom pogledu dobro vodljiv, npr. pričvršen s pomoću osiguranih vijaka odnosno zavarivanjem.
Pri primjeni obujmice za štapne uzemljivače treba upotrijebiti vijke polumjera najmanje 10 mm.
Spojna mjesta koja leže u zemlji treba zaštititi od korozije sigurnim zaštitnim prevlakama.

Članak 81.

Metalni dijelovi postrojenja koje treba uzemljiti, moraju se priključiti na uzemljivač neposredno s pomoću zemljovoda odnosno sabirnog zemljovoda.
Pojedine dijelove koji su čvrsto i dobro provodno električno spojeni s uzemljenim pločama temelja ili s čeličnom nosivom konstrukcijom, ne treba posebno uzemljiti.

Članak 82.

Čelične nosive konstrukcije koje čine cjelinu mogu se upotrebljavati za uzemljenje dijelova koji su za njih pričvršćeni ili u njima ugrađeni, ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

1) nosive konstrukcije moraju biti ispravno uzemljene u smislu odredaba ovog pravilnika
2) provodni presjeci čeličnih konstrukcija moraju biti dovoljno veliki i moraju ispunjavati uvjete predviđene ovim pravilnikom
3) spojena mjesta konstrukcije moraju biti zavarena ili pričvršćena s pomoću vijaka s podložnim pločicama tako da ostanu trajno dobro provodljiva
4) uzemljenje nosećih konstrukcija ne smije izgubiti od vrijednosti ako se napusti i skine dio postrojenja ili dio nosive konstrukcije
5) nosive konstrukcije duže od 10 m moraju na vodove za uzemljenje biti priključene najmanje na dva mjesta, koja su na što većoj međusobnoj udaljenosti.

Članak 83.

Dijelove nosivih konstrukcija koji se upotrebljavaju kao sabirni zemljovod treba po cijeloj duljini označiti posebnim premazom u boji, ako postoji mogućnost prekida zemljovoda skidanjem dijela konstrukcije. Za premaz konstrukcije treba izabrati upadljivu boju.

Članak 84.

Ne dopušta se uporaba čelične armature kabela za zemljovod ili njegov dio, ako ona nije građena za tu svrhu.

Članak 85.

Zemljovode armiranobetonskih nosivih konstrukcija i armiranobetonskih stupova treba položiti po površini stupa odnosno konstrukcije tako da se vide ili ih ubetonirati. Takvi

zemljovodi moraju imati lako pristupačne priključke zaštićene od korozije i ne smiju u unutrašnjosti betonske mase biti prekinuti.
Dopušteno je za zemljovode upotrijebiti armaturu konstrukcije, ali samo ako ona ima odgovarajuće dovoljno dimenzionirane presjeke, najmanje ekvivalentne 16 mm^2 Cu, i ako je po cijeloj duljini dobro zavaren ili je na koji drugi način ostvaren u električnom pogledu dobar vodljivi spoj.

Članak 86.

Zemljovodi koji su priključeni na vodovodnu mrežu [od metalnih cijevi] moraju biti priključeni ispred vodomjera, tj. na strani vodovodne mreže.

Članak 87.

Nije dopušteno za uzemljivače i zemljovodne vodiče upotrijebiti plinske, parne i toplinske cjevovode. U unutrašnjosti postrojenja (zgrade) treba te cjevovode po potrebi priključiti na zaštitno uzemljenje. Posebnim mjerama treba spriječiti iznošenje opasnog potencijala izvan postrojenja.

P6.6. Zaštitna uzemljenja

Primjena zaštitnih uzemljenja

Članak 88.

Sve metalne dijelove električnih naprava i aparata koji nisu pod naponom te ne spadaju među pogonske strujne krugove, ali prilikom kvarova mogu doći pod napon neposredno ili putem električnog luka, treba uzemljiti.

Članak 89.

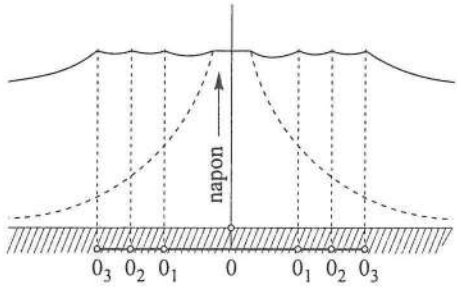
Obrtne metalne zaštitne mreže i ploče, kao i mreže i ploče koje se skidaju, treba uzemljiti ako nisu vodljivo vezane s uzemljenim dijelovima.
Kao vodljive veze smatraju se i šarke i vješalice pričvršćene na uzemljene dijelove, ako postoji dobar galvanski spoj.

Članak 90.

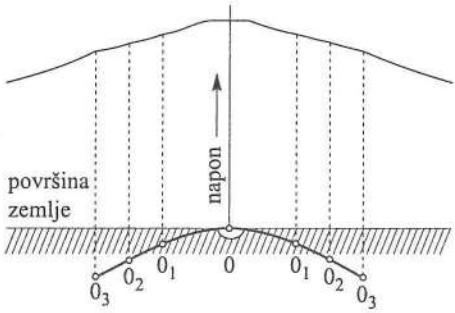
U zidanim, drvenim i nearmiranim zgradama ne smiju se, po pravilu, uzemljiti metalni dijelovi, kao što su okviri vrata, stepeništa, ljestve itd. koji su pristupačni izvana.
Odredbe stavka 1. ovog članka ne odnose se na one metalne dijelove koji mogu doći pod napon u slučaju zemnog spoja ili električnog luka.

Članak 91.

U metalnim zgradama ili zgradama od armiranog betona treba uzemljiti metalne dijelove navedene u članku 90. ovog pravilnika.
Metalni dijelovi ne smiju u slučaju zemljospoja dobiti napon prema zemlji viši od 125 V, pri čemu dodirni napon ne smije biti viši od 65 V. Taj uvjet može se ispuniti odgovarajućim rasporedom uzemljivača i izjednačavanjem potencijala, slika P6–1.



Sl. P6–1. Raspodjela potencijala na površini zemlje pri jednakoj dubini ukopavanja prstenova za izjednačavanje potencijala 0_1, 0_2 i 0_3.



Sl. P6–2. Raspodjela potencijala na površini zemlje pri nejednakoj dubini ukopavanja prstenova za izjednačavanje potencijala 0_1, 0_2 i 0_3.

Članak 92.

Metalne ručne kotače, poluge i ruke na aparatima ne treba posebno uzemljiti, ako su dobro vodljivo spojeni s uzemljenim aparatom ili dijelom. Uzemljenje je, međutim, potrebno ako se prijenos obavlja s pomoću lanaca, užadi, vrtila ili zupčanika, koje bi električni luk mogao zahvatiti u slučaju kvara.
U svakom slučaju preporučuje se izolacija kao dopunska zaštita.

Članak 93.

Prirubnice provodnih izolatora postavljenih na izolacijske ploče i okviri staklenih ploča za prolazak vodiča trebaju se uzemljiti pojedinačno ili zajedno.
Zidne kuke za pričvršćivanje zateznog izolatora treba uzemljiti.

Članak 94.

Metalne plašteve i armature kabela treba na oba kraja uzemljiti.

Članak 95.

Sekundarne strujne krugove mjernih transformatora treba uzemljiti neposredno na jednoj od priključnih stezaljki transformatora. Ako se pri uporabi više mjernih transformatora ne

može izvesti pojedinačno uzemljenje, strujne krugove treba uzemljiti bar na jednom mjestu. Spojni vodovi između transformatora trebaju biti što kraći. Pri upotrebi međutransformatora treba uzemljiti svaki strujni krug. Vod za uzemljenje između sekundarne priključne stezaljke i priključnog vijka za zaštitno uzemljenje treba imati presjek od najmanje 4 mm^2 Cu.

Članak 96.

Na kolicima za izvlačenje prekidača, naprave za uzemljenje pri izvlačenju prekidača trebaju zadržati vezu duže od kontakta za pogonsku struju. Pri uvlačenju prekidača naprave za uzemljenje trebaju se uključiti prije kontakta za pogonsku struju.

P6.7. Dimenzioniranje uzemljenja

Članak 97.

U mrežama s izoliranom neutralnom točkom zaštitno uzemljenje elektrana, transformatorskih i razvodnih stanica i potrošača treba dimenzionirati za cjelokupnu struju zemljospoja mreže.

Članak 98.

U mrežama s kompenziranom strujom zemljospoja, zaštitna uzemljenja dimenzioniraju se:

1) u postrojenjima u kojima su ugrađeni induktivni otpori, a zaštitno i pogonsko uzemljenje međusobno spojeno – za zbroj struje induktivnih otpora i preostale struje zemljospoja mreže u najnepovoljnijem slučaju
2) u postrojenjima u kojima su ugrađeni induktivni otpori, a zaštitno je uzemljenje odvojeno od pogonskog – za preostalu struju zemljospoja mreže u najnepovoljnijem slučaju
3) u postrojenjima bez induktivnih otpora – za preostalu struju zemljospoja mreže u najnepovoljnijem slučaju.

Članak 99.

U mrežama s neutralnom točkom uzemljenom preko otpora, zaštitno uzemljenje dimenzionira se za struju zemljospoja, ako postoji veza između zaštitnog i pogonskog uzemljenja.

Članak 100.

Pri strujama zemljospoja iz čl. 97. do 99. ovog pravilnika ne smije se pojaviti napon uzemljivača viši od 125 V. Ako se takav uvjet ne može ispuniti, treba primijeniti mjere predviđene u čl. 106. do 110. ovog pravilnika.
Otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] uzemljivača pri duljem prolasku struje može se povećati zbog zagrijavanja zemlje. Zbog toga se pri naponu uzemljivača od 125 V može dopustiti protjecanje struje zemljospoja samo u trajanju predviđenom u tablici P6–5.

P6.8. Dopušteno trajanje opterećenja uzemljivača

Tablica P6–5. Dopušteno trajanje opterećenja štapnih i trakastih uzemljivača.

Otpornost zemlje ρ_z, Ωm	Trajanje opterećenja, min	
	Štapni uzemljivač duljine 2 m, promjera 2″	Trakasti uzemljivač presjeka 100 mm^2
50	100	30
100	200	60
200	400	120
300	600	150

Pri naponu uzemljivača koji odstupa od vrijednosti 125 V, dopušteno vremensko opterećenje dobiva se množenjem vrijednosti (iz tablice P6–5.) faktorom $(125/U_z)^2$, gdje je U_z stvarni napon uzemljivača izražen u voltima.
Ako se iz tehničkih razloga navedeni uvjet ne može ispuniti, treba poduzeti mjere predviđene u čl. 106. do 110. ovog pravilnika.

Članak 101.

Pri zemljospoju u postrojenju, ne smije se pojaviti izvan postrojenja odnosno njegove ograde dodirni napon veći od 65 V. Takav uvjet može se ispuniti odgovarajućim izvođenjem ograde i uređaja za uzemljenje, kao i prikladnim oblikovanjem potencijala.

Članak 102.

Za dimenzioniranje zaštitnih uzemljenja u mrežama s neutralnom točkom izoliranom ili uzemljenom s pomoću induktivnog otpora, treba uzeti u obzir i struje dvostrukog zemljospoja, ako nije predviđeno automatsko isključenje oštećene dionice.

Članak 103.

U mrežama s efikasno uzemljenom neutralnom točkom zaštitna uzemljenja dimenzioniraju se za udio struje dozemnog kratkog spoja koja protječe kroz uzemljenje 0,25 s, po nastanku dozemnog kratkog spoja.
U pogledu zaštitnih uzemljenja za takve mreže vrijede i odredbe čl. 111. do 114. ovog pravilnika.

Članak 104.

Pri dimenzioniranju zajedničkog uzemljenja u postrojenju na kome su priključeni dalekovodi različitih napona, dovoljno je ako se uzme u obzir samo mreža s najvećom strujom zemljospoja.

P6.9. Mehaničko i toplinsko dimenzioniranje uzemljenja

Članak 105.

U mehaničkom i toplinskom pogledu sustavi uzemljenja dimenzioniraju se pri efikasno uzemljenoj neutralnoj točki – za struju jednopolnoga dozemnog kratkog spoja; a u ostalim

slučajevima – za struju dvostrukog zemljospoja, s tim što se pri tome vodi računa o vremenu isključenja zemljospoja, a kao najkraće trajanje uzima se 1 s.

Zaštitne mjere pri teškim uvjetima uzemljenja.

Članak 106.

Ako se iz tehničkih razloga (npr. na području s [velikim specifičnim otporom tla ρ_z]) zaštitno uzemljenje ne može izvesti u skladu s prethodnim člancima ovog pravilnika, treba primijeniti dopunske zaštitne mjere iz čl. 107. do 110. ovog pravilnika.

Članak 107.

Mjesta za rukovanje u postrojenjima moraju biti izolirana za puni napon uzemljivača.
Svi vodljivi dijelovi koji mogu s mjesta za rukovanje biti dohvaćeni, moraju biti međusobno spojeni.

Članak 108.

Stajališta za rukovanje u postrojenjima izrađuju se od metala i spajaju se s ostalim vodljivim dijelovima [(gdje je ispod stajališta mali mrežasti uzemljivač)].
Siguran pristup do stajališta za rukovanje omogućuje se izoliranom stazom širine najmanje 1250 mm. Za tu svrhu u unutrašnjosti zgrade može se upotrijebiti guma ili linoleum [(atestirani na odgovarajući napon)], a na otvorenom prostoru – krupan slabo vodljivi šljunak koji radi bolje izolacije može imati asfaltnu prevlaku.

Članak 109.

Sve ručke i vodljivi dijelovi s kojim se može doći u dodir za vrijeme rukovanja uređajem, izoliraju se od ostalih dijelova uređaja za najviši napon vodiča prema zemlji. Takve zaštitne mjere primjenjuju se obično u manjim postrojenjima za srednje napone (do 35 kV) u zidanim, betonskim, drvenim i sličnim zgradama.

Članak 110.

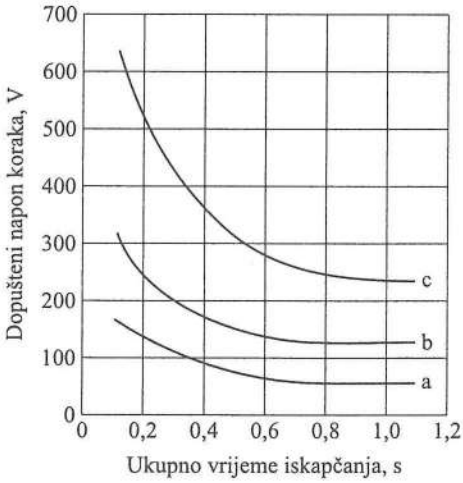
U postrojenju na otvorenom prostoru (vanjskom razvodnom postrojenju) u području dodira s transformatorima, konstrukcijom ili komandnim ormarima, pad napona na površini zemlje može se oblikovati gusto položenim trakastim uzemljivačima ili rešetkom.

P6.10. Posebne uredbe o uzemljenju

Ograde, kolosijeci, cjevovodi i telekomunikacijski kabeli u postrojenjima s efikasno uzemljenom neutralnom točkom.

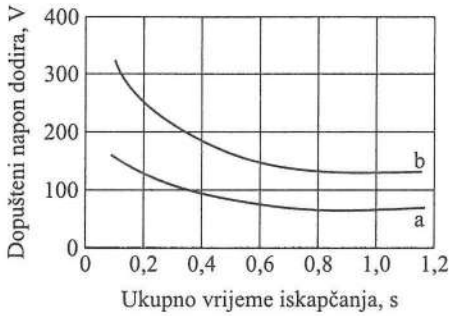
Članak 111.

Ograde visokonaponskih postrojenja treba postaviti tako da se pri zemljospoju ne pojave izvan ograde naponi dodira ili naponi koraka viši od onih označenih na slikama P6–3. i P6–4. Dopušteni napon koraka u postrojenjima s efikasno uzemljenom neutralnom točkom, ovisno o vremenu isključenja dionice u kvaru, dan je na sl. P10–3., a dopušteni napon dodira na slici P6–4.



a) izvan postrojenja na putovima s javnim prometom
b) na ostalim mjestima izvan postrojenja i u okviru ograde postrojenja
c) u krugu vanjskih postrojenja, uz uporabu zaštitne izolacijske obuće dielektrične čvrstoće od najmanje 3 kV.

Sl. P6–3. Dopušteni napon koraka.



a) izvan postrojenja
b) u postrojenju.

Sl. P6–4. Dopušteni dodirni napon.

Članak 112.

Ako se na metalnoj ogradi pojavi previsok napon dodira, s vanjske strane ograde na udaljenosti od 1 m polaže se trakasti uzemljivač ukopan u dubinu od 0,5 m, s kojim se povezuje ograda.

Za odvođenje induktivnih struja ograde dovoljni su manji štapni ili trakasti uzemljivači ako sigurnost od napona dodira ne zahtijeva polaganje metalne trake.

Kolosijeci, cjevovodi i vanjski metalni plaštevi kabela koji izlaze iz visokonaponskog postrojenja električno se odvajaju izoliranjem s pomoću umetaka (po potrebi na više mjesta) da bi se spriječilo prenošenje opasnih potencijala izvan postrojenja.

Članak 113.

Primjena posebnih zaštitnih mjera u koji se odnose na napon koraka i dodirni napon nije potrebna na području kabela koji su u sastavu opsežnije kabelske mreže napona iznad 1 kV, ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

1) da su kabeli položeni u zemlju i da imaju dobro provodne vanjske metalne plašteve
2) da duljina kabelske mreže iznosi najmanje 10 km

3) da je struja zemljospoja ograničena na najviše 1500 A
4) da vrijeme isključenja dionice u kvaru nije duže od 3 sekunde.

P6.11. Stupovi za nadzemne vode

Članak 114.

Čelične i armiranobetonske stupove, kao i metalne žice ili trake na drvenim stupovima koji služe za zaštitu drvenih stupova od udara groma, treba uzemljiti.

Stupovi s linijskim rastavljačima, transformatorima i kabelskim glavama.

Članak 115.

Nosive konstrukcije rastavljača na drvenim stupovima sa zaštitnim užetom ili bez njega ne treba po pravilu uzemljiti ni spojiti na zaštitno uže.
Ako nosive konstrukcije rastavljača na drvenim stupovima nisu uzemljene, u poluge za rukovanje treba ugraditi izolatore koji imaju dovoljnu mehaničku čvrstoću, a dielektričnu čvrstoću bar toliku koliku imaju izolatori na nadzemnom vodu.
Dio poluge ispod izolatora mora se uzemljiti. Uzemljivač treba izvesti tako da istodobno zaštićuje rukovatelja (osiguranjem stajališta na potencijalu) [vidi sl. 13.3–4. i 13.3–5].

Članak 116.

Nosive konstrukcije rastavljača na metalnim stupovima, armiranobetonskim stupovima i drvenim stupovima s metalnim premošćenjem treba uvijek uzemljiti.
Oko metalnog stupa i armiranobetonskog stupa treba ukopati uzemljivač tako da dodirni napon ne bude viši od 65 V.
Na stajalištu drvenog stupa za rukovanje polugama treba ukopati na dubinu od oko 10 cm mrežasti uzemljivač i vezati ga polugama.

Članak 117.

Metalne kabelske plaštove i glave na drvenim, metalnim i betonskim stupovima treba uzemljiti u skladu s odredbama članka 114. ovog pravilnika.

Članak 118.

Nosivu konstrukciju za transformatore, kondenzatore i slične uređaje na stupovima treba zaštitno uzemljiti (članak 114.).
Za zaštitno uzemljenje treba spojiti i sve ostale metalne konstrukcije na stupu, pa i linijski rastavljač.
Oko uzemljenih stupova s transformatorima treba postaviti uzemljivač za izjednačenje potencijala u vidu prstena oko stupa, npr. na udaljenosti od 1 m i dubini od 0,5 m i povezati ga s uzemljenjem stupa.

P6.12. Pokretna transformatorska postrojenja

Članak 119.

Zaštitno uzemljenje pokretnih transformatorskih postrojenja trebaju ispunjavati uvjete predviđene odredbama čl. od 66. do 79. i čl. od 97. do 104. ovog pravilnika.

Članak 120.

Pokretna transformatorska postrojenja na vozilima (npr. za poljoprivredne strojeve) treba ograditi tako da se onemogući slučajan dodir dijelova vozila, priključnog stupa i zemljovoda. Vozilo mora imati i izolirano stajalište za osoblje.

Članak 121.

Pokretna transformatorska postrojenja za priključak na nadzemne vodove treba uzemljiti na dovoljnoj udaljenosti, npr. na susjednom stupu. Zemljovod treba izvesti do uzemljivača izolirano od zemlje. Ako se polaže na priključni stup, zemljovod mora biti udaljen najmanje 100 mm od noseće konstrukcije linijskih rastavljača i konzola.

Članak 122.

Na linijske rastavljače na stupu primjenjuju se odredbe čl. od 115. do 118. ovog pravilnika.

P6.13. Sprave za povremeno uzemljenje i kratko spajanje

Članak 125.

Pri radu na nadzemnom vodu, vod po isključenju treba na svim isključnim mjestima rastaviti, uzemljiti i kratko spojiti, u skladu s odredbama tehničkih propisa koji su na snazi i koji se odnose na pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja.

Članak 126.

Stalno ugrađene naprave (rastavljači za uzemljenje) [zemljospojnici] trebaju ispunjavati uvjete predviđene normama koje su na snazi za visokonaponske aparate. Rastavljače za uzemljenje treba ugraditi na ulazu vodova u razvodno postrojenje ako se u blizini postrojenja ne nalaze linijski rastavljači ili prekidači.

Članak 127.

Pri primjeni prijenosnih naprava za uzemljenje treba upotrebljavati sigurne kontakte za najmanje 200 A za priključak na uzemljivače odnosno zemljovod i na vodove.
Za uzemljivače treba upotrebljavati savitljivu bakrenu užad presjeka od najmanje 25 mm^2, upletenu od tanke žice.
Kontakte i užad za uzemljenje treba dimenzionirati tako da struju kratkog spoja na isključenom mjestu izdrže bar 1 sekundu.

Tablica P6–6. [Dopuštena struja kratkog spoja za različito trajanje kratkog spoja i za navedene presjeke bakrenog užeta za uzemljenje i kratko spajanje.]

Presjek bakrenog užeta, mm^2	Najveća dopuštena struja kratkog spoja u trajanju od		
	10 s, kA	5 s, kA	1 s, kA
25	1,5	2	4
35	2	2,5	5,5
50	3	4	8
70	4	5,5	11,5

Najveće dopuštene vrijednosti struje kratkog spoja ovisno o presjeku bakrenog užeta za uzemljenje i vremenu trajanja dane su u tablici P6–6.

P6.14. Pogonska uzemljenja [ili radno uzemljenje]

Članak 128.

U pogonska uzemljenja ubrajaju se:

1) uzemljenja visokonaponskih namotaja mjernih naponskih transformatora
2) uzemljenja mjernih kondenzatora
3) uzemljenja aktivnih i reaktivnih (induktivnih) otpora u nultim točkama generatora i transformatora za indirektno uzemljenje
4) uzemljenje nulte točke transformatora, direktno ili preko malih otpora uzemljene mreže
5) uzemljenje mutatora.

Članak 129.

Pogonska uzemljenja postrojenja moraju biti dimenzionirana za najveću struju pri zemljospoju.
Ako u postrojenju ima više mrežnih napona, zajedničko pogonsko uzemljenje dimenzionira se za onu mrežu kroz čiju nultu točku pri zemljospoju teče najveća struja.

Članak 130.

Pogonska uzemljenja iz članka 128. toč. 1. i 2. ovog pravilnika u elektranama i transformatorskim i razvodnim stanicama priključuju se na zaštitno uzemljenje.

Članak 131.

Pogonska uzemljenja iz članka 128. točka 3. ovog pravilnika mogu se priključiti na zaštitno uzemljenje ako se pri zemljospoju ne pojavljuje napon uzemljivača viši od 125 V.
Ako uvjet iz stavka 1. ovog članka nije ispunjen, treba predvidjeti posebno pogonsko uzemljenje na tolikom razmaku od zaštitnog uzemljenja da se na uzemljivaču zaštitnog uzemljenja ne može pojaviti napon viši od 125 V.
Ako se na uzemljivaču pogonskog uzemljenja može pojaviti napon viši od 125 V, njegovi zemljovodi trebaju biti izolirani i zaštićeni od dodira. Napon koraka ne smije biti viši od 90 V. To se postiže postavljanjem zaštitne ograde ili izjednačenjem potencijala.
Odredbe stavka 2. ovog članka, ne odnose se na pogonsko i zaštitno uzemljenje, ako su teški uvjeti za uzemljenje, s tim što se onda moraju primijeniti odredbe članaka od 106. do 110. ovog pravilnika.

Članak 132.

Za pogonska uzemljenja navedena u članku 128. točka 4. ovog pravilnika u mrežama s efikasnom uzemljenom neutralnom točkom vrijede odredbe članka 142. ovog pravilnika, pri čemu napon uzemljivača nije ograničen na 125 V, ako su uzemljivači raspoređeni tako da osobe nisu ugrožene s obzirom na napon dodira i napon koraka, i to kako na ograđenom zemljištu visokonaponskog postrojenja tako i izvan njega. Taj je uvjet ispunjen ako se naponi dodira i koraka kreću u granicama vrijednosti navedenim na sl. P6–3. i P6–4.

Članak 133.

Neposredno oko transformatora nosivih konstrukcija, komandnih ormara i sl. treba, s pomoću plitko kopanih traka ili mreža za uzemljenje, izjednačavati potencijal, tako da na dohvatu navedenih dijelova postrojenja napon dodira ne prelazi vrijednost prema sl. P6–2.

Članak 134.

Ako na rubnim stazama u krugu postrojenja na otvorenom prostoru mogu nastati previsoki naponi koraka, takve staze treba ograditi ili sniziti napon koraka na dopuštenu vrijednost prema sl. P6–3.
Opasnost može biti otklonjena i izoliranim prolazima, nasipanjem krupnog šljunka ili tucanika, a posebno asfaltiranjem.
Napon koraka po krivulji »c« na slici P6–3. dopušta se samo ako dielektrična čvrstoća izolacijske obuće iznosi najmanje 3 kV.

Članak 135.

U postrojenjima u zgradama, umjesto oblikovanja potencijala dopušta se kao zaštitno sredstvo postavljanje izoliranih stajališta, npr. gumenih tepiha s dielektričnom čvrstoćom koja je bar jednaka dvostrukom naponu uzemljivača, a koja iznosi najmanje 2 kV.
Izolirana mjesta za rukovanje trebaju biti izvedena tako da rukovatelj može jedino s izoliranog stajališta dodirnuti provodljive dijelove postrojenja koji normalno nisu pod naponom.
Svi vodljivi dijelovi koji se mogu dohvatiti s izoliranog stajališta trebaju biti međusobno spojeni.

Članak 136.

S pomoću metalnih umetaka (npr. čeličnih armatura položenih u temelje zgrade i spojenih s uzemljenjem) mogu se izbjeći opasni naponi koraka odnosno naponi dodira u unutrašnjosti zgrade.
U postojećim zgradama to se postiže s pomoću metalnih traka koje su položene neposredno iznad tla, spojene s uzemljenjem i opskrbljene metalnim klinovima zabijenim u zidove na međusobnoj udaljenosti od 1 m. Na taj se način na zid prenese potencijal uzemljenja.
Otklanjanje opasnih napona postiže se i trakastim uzemljivačem položenim u zemlju uz same temelje i spojenim s uzemljenjem.

P6.15. Spajanje zaštitnih i pogonskih uzemljenja

Elektrane i transformatorske stanice koje imaju postrojenja za vlastite potrebe napona do 1 kV.

Članak 137.

Zaštitno uzemljenje postrojenja napona iznad 1 kV treba uvijek spojiti sa zaštitnim uzemljenjem postrojenja napona do 1 kV.

Članak 138.

Zaštitna uzemljenja spojena u smislu članka 137. ovog pravilnika, mogu se spajati s pogonskim uzemljenjima postrojenja do 1 kV ako su ta postrojenja namijenjena samo za osobne potrebe elektrana ili transformatorskih stanica. Kao postrojenja za osobne potrebe

smatraju se električne instalacije za pogon pomoćnih aparata i za osvjetljenje postrojenja, kao i odgovarajuće instalacije u pogonskim, kancelarijskim i stambenim prostorijama koje se nalaze na području jedinstvenog sustava uzemljenja.

Članak 139.

Pogonska uzemljenja mjernih naponskih transformatora i kondenzatora za nazivne napone iznad 1 kV priključuju se na zaštitna uzemljenja postrojenja preko 1 kV, u smislu članka 130. ovog pravilnika. Na uzemljenje i vodove uzemljenja zaštitnog uzemljenja treba najkraćim putem vezati i uzemljenja odvodnika prenapona.

Članak 140.

Pogonska uzemljenja aktivnih i reaktivnih (induktivnih) otpora za neutralnu točku u postrojenjima iznad 1 kV mogu se spojiti za zaštitna uzemljenja tih postrojenja pod uvjetom navedenim u članku 131. ovog pravilnika.

Članak 141.

Pogonska uzemljenja postrojenja napona iznad 1 kV mogu se spajati na pogonska uzemljenja postrojenja napona do 1 kV samo ako su ispunjeni uvjeti iz čl. 138. i 140. ovog pravilnika.

Članak 142.

U postrojenjima napona iznad 1 kV s efikasno uzemljenom neutralnom točkom treba međusobno povezati sva uzemljenja u postrojenju uz ispunjenje uvjeta predviđenih u čl. od 106. do 110. i članku 132. ovog pravilnika.
Gromobransku užad nadzemnih vodova u mrežama s efikasno uzemljenom neutralnom točkom treba vezati s pripadajućim pogonskim uzemljenjem.
Elektrane i transformatorske stanice s postrojenjima za vlastite potrebe i za isporuke električne energije potrošačima na naponu do 1 kV.

Članak 143.

Zaštitna uzemljenja postrojenja iznad 1 kV postrojenja napona do 1 kV treba spojiti ako se oba postrojenja nalaze u zajedničkim pogonskim prostorijama. Kućišta niskonaponskih razvodnih ormara nije dopušteno spojiti s zaštitnim uzemljenjem postrojenja iznad 1 kV, ako se ti ormarići nalaze s vanjske strane transformatorskih stanica.
Kućišta razvodnih ormarića kod transformatorskih stanica koja su pristupačna izvana mogu se spojiti sa zaštitnim uzemljenjem postrojenja iznad 1 kV, ako se na uzemljenju ne može pojaviti napon viši od 65 V ili ako je položen sustav za izjednačavanje potencijala, koji ne omogućava dodirni napon viši od 65 V.
Odredba stavka 2. ovog članka primjenjuje se ako sva uzemljenja nisu međusobno povezana ili ako su uzemljenja odvojena, a mreža niskog napona ne ispunjava uvjete za nulovanje.

Članak 144.

U zgradama u kojima se nalaze nosive konstrukcije visokonaponskih i niskonaponskih postrojenja treba međusobno spojiti oba zaštitna uzemljenja.

Članak 145.

Sva uzemljenja postrojenja iznad 1 kV i postrojenja do 1 kV treba po pravilu spojiti sa zajedničkim uzemljivačem.

Ako u slučaju zemljospoja nije osigurano brzo isključenje mreže iznad 1 kV, zajednički uzemljivač može imati brzo isključenje mreže iznad 65 V.
Ako je u slučaju zemljospoja osiguran brzi automatski uklop (APU) mreže iznad 1 kV, zajednički uzemljivač može imati viši napon od 65 V, za vrijednosti koje su za dodirni napon navedene u članku 111. ovog pravilnika.
Ako je nemoguće ispuniti uvjete iz stavka 2. i 3. ovog članka, pogonsko uzemljenje postrojenja napona iznad 1 kV treba postaviti odvojeno od uzemljenja postrojenja napona iznad 1 kV, i to na udaljenost od najmanje 20 m.

P6.16. Ispitivanje sustava uzemljenja

Članak 157.

Za mjerenje napona posebno je pogodan elektronski voltmetar.
Za štapne ili pločaste uzemljivače dovoljna je udaljenost od 40 m između uzemljivača te između uzemljivača i sonde. Takve udaljenosti za uzemljivače postavljene na velikom prostoru trebaju biti 5 odnosno 2,5 puta veće od najveće udaljenosti čiji se otpor mjeri.

Članak 158.

Otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] uzemljivača mjeri se:

1) s pomoću instrumenata za mjerenje otpora uzemljenja
2) po metodi mjerenja struje i napona, pri čemu voltmetar treba imati najmanje dvostruki otpor uzemljenja sonde.

Za mjerenje napona naročito je pogodan elektronski voltmetar. Na uzemljivač i pomoćni uzemljivač priključuje se naizmjenični napon, a zatim mjeri struja (I_z) uzemljivača i napon (U_z) između uzemljivača i sonde.
Otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] uzemljivača dobiva se iz formule [$R_r \equiv R_z = U_z/I_z$]

P7. Izvod iz Uputa za projektiranje, izgradnju i održavanje uzemljenja PTT objekata i postrojenja (PTT vjesnik br. 9/83). Izvođenje uzemljenja u telefonskim kabelskim mrežama

P7.1. Opće odredbe

1.1. Ova uputa propisuje načine projektiranja, gradnje i pregleda uređaja za uzemljenje telefonskih kabelskih vodova u mjesnim i međumjesnim mrežama.

1.2. Izrada uzemljenja PTT objekata i postrojenja u njima obavlja se u skladu s *Uputom za projektiranje, izgradnju i održavanje uzemljenja PTT objekata i postrojenja* (»PTT vjesnik«, br. 9/83).

P7.2. Osnovni pojmovi

2.1. Pod uzemljenjem razumijeva se električna provodna veza između zemlje i provodnih dijelova koji se uzemljuju. Uzemljenje se sastoji od uzemljivača i zemljovoda.

2.2. Radno je uzemljenje uzemljenje dijela telekomunikacijskog uređaja koji pripada radnom strujnom krugu. Preko voda radnog uzemljenja teče radna struja uređaja koja se koristi zemljom kao povratnim vodom.

Primjer radnog uzemljenja uzemljenje je jednog pola baterije radi uporabe zemlje kao dijela strujnog kruga. U radno uzemljenje može se svrstati i uzemljenje metalnih omotača telekomunikacijskih kabela koje se izvodi radi umanjenja smetnja i šumova na navedenim kabelima radi utjecaja vanjskih električnih i magnetskih polja i galvanske veze između vodova. Također u radno uzemljenje ubraja se i uzemljenje namijenjeno za održavanje određenoga referentnog potencijala u odnosu na zemlju (npr. uzemljenje ispitnog stola).

2.3. Zaštitno uzemljenje izravno je uzemljenje vodljivih dijelova uređaja koji ne pripadaju radnom strujnom krugu, a primjenjuje se radi zaštite ljudi od opasnoga dodirnog napona ili napona koraka.

2.4. Telekomunikacijsko radno (pogonsko) i zaštitno uzemljenje uzemljenje je kod kojeg je istodobno primijenjeno radno uzemljenje kao zaštitno uzemljenje, a koje koristi zajednički vod uzemljenja.

2.5. Gromobransko uzemljenje uzemljenje je dijelova uređaja radi odvođenja u zemlju struja uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem (npr. uzemljenje uporišta).

2.6. Uzemljivači su metalni dijelovi koji se nalaze u zemlji i ostvaruju električni vodljivi spoj uzemljenih dijelova postrojenja sa zemljom, te neizolirani vodiči koji služe za spajanje postrojenja sa zemljom na dijelu u kojem su položeni u zemlju. Ovisno o obliku, uzemljivači mogu biti površinski (trakasti), dubinski (štapni), pločasti i kombinirani.

2.7. Zemljovod je vod koji položen izvan zemlje ili izoliran u zemlju, a koji s uzemljivačem povezuje dijelove uređaja koje treba uzemljiti.

2.8. Sabirni zemljovod vod je na koji je priključeno više vodiča za uzemljenje.

2.9. Sustav uzemljenja skup je međusobno provodno povezanih uzemljivača, zemljovoda i sabirnih zemljovoda.

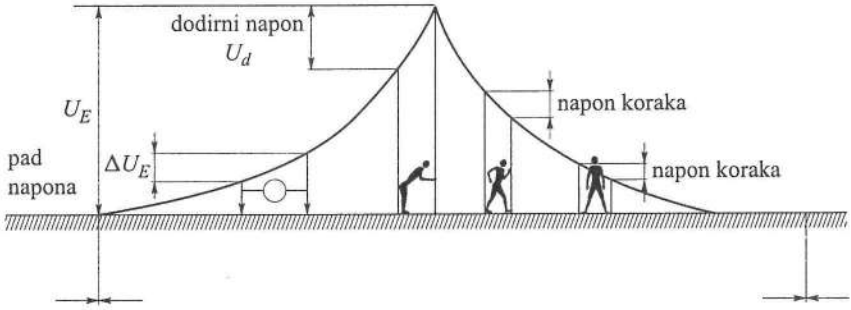
2.10. Otpora uzemljenja zbroj je otpora uzemljivača prijelaznog otpora, otpora rasprostiranja uzemljivača i otpora zemljovoda, [(koji je poistovjećen s otporom uzemljenja)].

2.11. Otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] uzemljivača, odnosno sustava uzemljenja, te otpor zemlje između uzemljivača i referentne zemlje. Pod referentnom zemljom razumijeva se područje zemljišta, a osobito njegova površina, koje je od pripadajućeg uzemljivača udaljena toliko da se između bilo kojih točaka toga područja ne pojavljuju značajne razlike potencijalna (slika P7–1).

2.12. Prijelazni otpor uzemljivača otpor je između uzemljivača i zemlje.

2.13. Specifični otpor zemlje električni je otpor 1 m^3 zemlje izmjeren između dvije nasuprotne strane kocke čiji je rub 1 m i izračunava se u om-metrima (Ωm).

2.14. Prenaponsko ili osiguračko uzemljenje uzemljenje je koje osigurava pražnjenje prenapona koji se na vodovima pojavi zbog različitih uzroka i odvodi ih u zemlju.



Sl. P7–1. Grafički prikaz raspodjele napona uzemljivača U_C pri zemljospoju (naponski lijevak).

2.15. Napon uzemljivača napon je koji pri struji zemljospoja nastaje između uzemljivača, odnosno između sustava uzemljenja i referentne zemlje (slika P7–1). Pod zemljospojem smatra se kvar koji stvara provodnu vezu dijelova pod naponom sa zemljom.

2.16. Naponski lijevak prostorna je figura koja pokazuje raspodjelu napona oko uzemljivača pri zemljospoju (slika P7–1).

2.17. Dodirni napon dio je napona uzemljivača koji čovjek može premostiti dodirom (slika P7–1).

2.18. Napon koraka dio je napona uzemljivača koji čovjek može premostiti korakom duljine 1 m (slika P7–1).

P7.3. Osnovne postavke pri projektiranju i izvođenju uzemljenja

3.1. Uređaji za uzemljenje trebaju omogućiti vezu između telekomunikacijskog postrojenja i zemlje da bi:

- zemlju upotrijebili kao dio radnog strujnog kruga
- ometajuće i opasne struje odvodili u zemlju
- odredili jednoznačno definirane referentne potencijale (npr. pri mjerenjima) i
- štitili od suviše visokih napona koraka i dodirnog napona.

3.2. Sukladno navedenim zadacima treba razlikovati:

- radna uzemljenja kod kojih se točno određene otpornosti uzemljenja moraju održavati i
- uzemljenja za zaštitu od utjecaja i uzemljenja za zaštitu od udara groma preko kojih je omogućeno aktiviranje prenaponskih odvodnika i neposredno uzemljenje ekrana i nosećega čeličnog užeta samonosivih kabela.

Uređaji radnih uzemljenja mogu se istodobno upotrijebiti i za uzemljenja za zaštitu od utjecaja i za uzemljenja za zaštitu od udara groma i obrnuto.

3.3. U načelu pri planiranju uređaja za uzemljenje treba razlikovati:

- uređaje za uzemljenje u telefonskim centralama
- uređaje za uzemljenje u linijskoj mreži (npr. kod linijskog razdjelnika, kod kabelskog razdjelnika, kod pojačivačkog mjesta, kod ormara za koncentrator, kod kabelskog izvoda, kod nastavaka na samonosivom kabelu).

3.4. U objektima gdje postoji temeljni uzemljivač, u kombinaciji sa sabirnim zemljovodnim prstenom ili sabirnom zemljovodnom šinom za izjednačavanje potencijala, istodobno je i uzemljivač za radno zaštitno uzemljenje telekomunikacijskih postrojenja i vodova.

3.5. Za telekomunikacijska postrojenja, koja za svoj rad zahtijevaju radno uzemljenje, dopuštene najveće vrijednosti otpora uzemljenja su:

- 30 oma za: izvode i razdjelnike, pretplatničke uređaje, kutije za dvojne priključke, koncentratore, uređaje za signalizaciju i uređaje za daljinsko napajanje
- 20 oma za mjesne telefonske centrale do 100 brojeva i pretplatničke (kućne) centrale od 100 do 500 priključaka
- 5 oma za mjesne telefonske centrale od 1000 do 2000 brojeva, pretplatničke (kućne) centrale od 500 do 1000 priključaka RR uređaja
- 2 oma za mjesne telefonske centrale od 1000 do 2000 brojeva, pretplatničke (kućne centrale od 1000 do 20000 priključaka, NF pojačivačke stanice, VF pojačivačke stanice bez posade, pojačivače za radio prijenos, centrale za prijenos podataka, uređaje za radio prijenos sa uvedenim kabelima
- 0,5 oma za mjesne telefonske centrale preko 2000 brojeva, pretplatničke (kućne) centrale preko 2000 priključaka, međumjesne centrale (TC, GC, ČC), VF pojačivačke stanice, uređaje za telegrafski prijenos.

U iznimno teškim uvjetima (pjeskoviti ili stjenoviti tereni) gdje je vrijednost specifične otpornosti tla vrlo velika ($\rho_z > 500\ \Omega$m) mogu se dopuštati i vrijednosti otpora do 20 oma.

Niže su vrijednosti otpora uzemljenja od dopuštenih najvećih vrijednosti poželjne, jer se vremenom otpor rasprostiranja uzemljivača može povećati zbog raznih vanjskih utjecaja (npr. promjena vrijednosti specifičnog otpora zemljišta).

Kod zahtijevanih vrijednosti otpora uzemljenja ukoliko postoji više stupova spojenih uzemljivača i zemljovoda, mjerodavan je otpor na sabirnom zemljovodu.

Ako elektroenergetski vod nema zaštitno uže, na stupovima telekomunikacijskih vodova koji se nalaze na krajevima raspona križanja s elektroenergetskim vodovima napona preko 250 V prema zemlji, treba postaviti gromobrane čije uzemljenje u pravilu treba imati električni otpor manji od 25 oma.

3.6. Ako je više postrojenja koja zahtijevaju radna uzemljenja priključeno na jedan skupni uređaj za uzemljenje, tada za uređaj za uzemljenje vrijedi zahtijevana pojedinačna vrijednost otpora uzemljenja.

3.7. Uzemljenja za zaštitu od udara groma i uzemljenja za zaštitu od utjecaja omogućavaju aktiviranje prijenosnih odvodnika i neposredno uzemljenje ekrana ili opleta od čeličnih žica samonosivih kabela s opletom, odnosno samonosivih kabela s nosećim užetom.

Tablica P7–1. Dubinski uzemljivači. Očekivani otpor uzemljenja R_z, (Ω) za istosmjernu i tehničku neizmjeničnu struju kod okomito pobijenih štapova uzemljivača. Promjer jednog štapa uzemljivača $d = 25$ mm*. Duljina jednog štapa uzemljivača $l = 1{,}5$ m, $R_z = \rho_z/(2\pi l)\ln(2{,}94l/d)$.

Vrsta zemljišta \ Broj štapova	ρ_z, Ωm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		R_z, Ω														
Modra glina	10	5,5	3	2,1	1,7	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	16,5	9	6,3	5,1	4,2	3,0	3,0	2,7	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
Lapor, suhi treset	80	44	24	17,0	14	11,5	9,0	8,0	7,2	6,4	6,0	5,8	5,4	5,1	4,7	4,5
Ilovača i glinasto zemljište	100	55	30	21	17	14	12	10	9	8	7,5	7,3	6,8	6,3	5,9	5,6
Sitni, vlažni pijesak	150	82,5	45	31,5	26,4	21	18	15,0	13,5	12,0	11,3	10,9	10,2	9,5	8,9	8,4
Grubi, vlažni pijesak	200	110	60	42	34	28	24	20	18	16	15,0	14,6	13,5	12,6	11,8	11,1
Sitni, suhi pijesak	750	412	225	158	128	110	90	75	68	60	56,4	54,8	50,8	47,4	44,4	41,8
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	550	300	210	170	140	120	100	90	80	75	73	67,7	63,2	59,2	55,7
Kamenito zemljište	3000	1650	900	630	510	420	360	300	270	240	225	219,1	203,1	189,5	177,6	167,2

* Ove vrijednosti u prvoj aproksimaciji mogu biti uzete za štapove dubinskog uzemljivača promjera 30 mm.

Tablica P7–1. Nastavak.

Vrsta zemljišta \ Broj štapova	ρ_z, Ωm	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		R_z, Ω														
Modra glina	10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
Lapor, suhi treset	80	4,2	4,0	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4
Ilovača i glinasto zemljište	100	5,3	5,0	4,8	4,5	4,3	4,2	4,0	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0
Sitni, vlažni pijesak	150	7,9	7,5	7,1	6,8	6,5	6,2	6,0	5,7	5,5	5,3	5,2	5,0	4,8	4,7	4,3
Grubi, vlažni pijesak	200	10,5	10,0	9,5	9,1	8,7	8,3	8,0	7,7	7,4	7,1	6,9	6,7	6,4	6,2	6,1
Sitni, suhi pijesak	750	39,5	37,5	35,6	34,0	32,5	31,1	29,9	28,7	27,7	26,7	25,8	25,0	24,2	23,4	22,7
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	52,7	50	47,5	45,3	43,3	41,5	39,9	38,2	36,9	35,6	34,4	33,3	32,2	31,2	36,3
Kamenito zemljište	3000	158.1	149,9	142,6	136,0	130,0	124,6	119,6	115,0	110,8	106,8	103,2	99,8	96,7	93,7	91,0

Tablica P7–2. Jednostruki i dvokraki površinski uzemljivači*. Očekivani otpor uzemljenja R_z, (Ω) za istosmjernu i tehničku izmjeničnu struju, pri dubini ukopa $h = 1$ m, $R_z = \rho_z/(\pi l)\ln(2l/\sqrt{d \cdot h} - 1)$.

Vrsta zemljišta \ Duljina krakova uzemljivača, l, m	ρ_z, Ωm	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
		R_z, Ω													
Modra glina	10	7,0	4,6	3,5	2,8	2,4	1,4	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	21,1	19,8	10,5	8,6	7,3	4,3	3,1	2,5	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2
Lapor, suhi treset	80	56,3	37,0	28,1	22,9	19,5	11,5	8,3	6,6	5,5	4,8	4,2	3,7	3,4	3,1
Ilovača i glinasto zemljište	100	70,4	46,2	35,1	28,6	24,3	14,4	10,4	8,3	6,9	5,9	5,2	4,7	4,2	3,9
Sitni, vlažni pijesak	150	105,6	69,4	52,7	43,0	36,5	21,6	15,7	12,4	10,4	8,9	7,9	7,0	6,4	5,8
Sitni, suhi pijesak	750	528,1	346,8	263,5	214,8	182,5	108	78,3	62,2	51,9	44,7	39,3	35,2	31,9	29,2
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	704,2	462,5	351,3	286,4	242,7	144,0	104,4	82,9	69,2	59,6	52,5	47,0	42,6	39,0
Kamenito zemljište	3000	2112	1387	1054	859	730,0	432	313,3	248,7	207,5	178,7	157,4	140,9	127,8	177,0

* Za dvokraki površinski uzemljivač treba za l staviti zbroj duljina obaju krakova

Tablica P7–2. Nastavak.

Vrsta zemljišta \ Duljina krakova uzemljivača, l, m	ρ_z, Ωm	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
		R_z, Ω														
Modra glina	10	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Lapor, suhi treset	80	2,9	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4
Ilovača i glinasto zemljište	100	3,6	3,3	3,1	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,4	2,2	2,1	2,00	1,9	1,9	1,8
Sitni, vlažni pijesak	150	5,4	5,0	4,7	4,4	4,2	3,9	3,7	3,6	3,4	3,3	3,1	3,00	2,9	2,8	2,7
Grubi, vlažni pijesak	200	7,2	6,7	6,3	5,9	5,5	5,2	5,0	4,7	4,5	4,3	4,2	4,00	3,9	3,7	3,6
Sitni, suhi pijesak	750	27,0	25,1	23,5	22,0	20,8	19,7	18,7	17,8	17,0	16,3	15,6	15,00	14,4	13,9	13,4
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	36,0	33,5	31,3	29,3	27,7	26,2	24,9	23,7	22,7	21,7	20,8	20,00	19,3	18,6	17,9
Kamenito zemljište	3000	108,0	100,4	93,8	88,1	83,1	78,7	74,8	71,2	68,0	65,1	62,4	60,01	57,8	55,7	53,8

Tablica P7–2. Nastavak.

Duljina krakova uzemljivača, l, m / Vrsta zemljišta	ρ_z, Ωm	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
		R_z, Ω														
Modra glina	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Lapor, suhi treset	80	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ilovača i glinasto zemljište	100	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2
Sitni, vlažni pijesak	150	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8
Grubi, vlažni pijesak	200	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4
Sitni, suhi pijesak	750	13,0	12,6	12,2	11,8	11,5	11,2	10,9	10,6	10,3	10,1	9,8	9,6	9,4	9,2	9,0
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	17,3	16,8	16,3	15,8	15,3	14,9	14,5	14,1	13,8	13,4	13,1	12,8	12,5	12,2	12,0
Kamenito zemljište	3000	52,0	50,3	48,8	47,3	46,0	44,7	43,5	42,4	41,3	40,3	39,3	38,4	37,5	36,7	35,9

Tablica P7–3. Trokraki površinski trakasti uzemljivač*. Očekivane vrijednosti otpora uzemljenja R_z, (Ω) za jednosmjernu i izmjeničnu tehničku struju. l – duljina krakova uzemljivača, m, d – promjer uzemljivača, m (d = 0,008 m) h – dubina polaganja, m (cca 1 m), $R_z = \rho_z/(3\pi l)\ln(2l/\sqrt{d \cdot h} + 0{,}53)$.

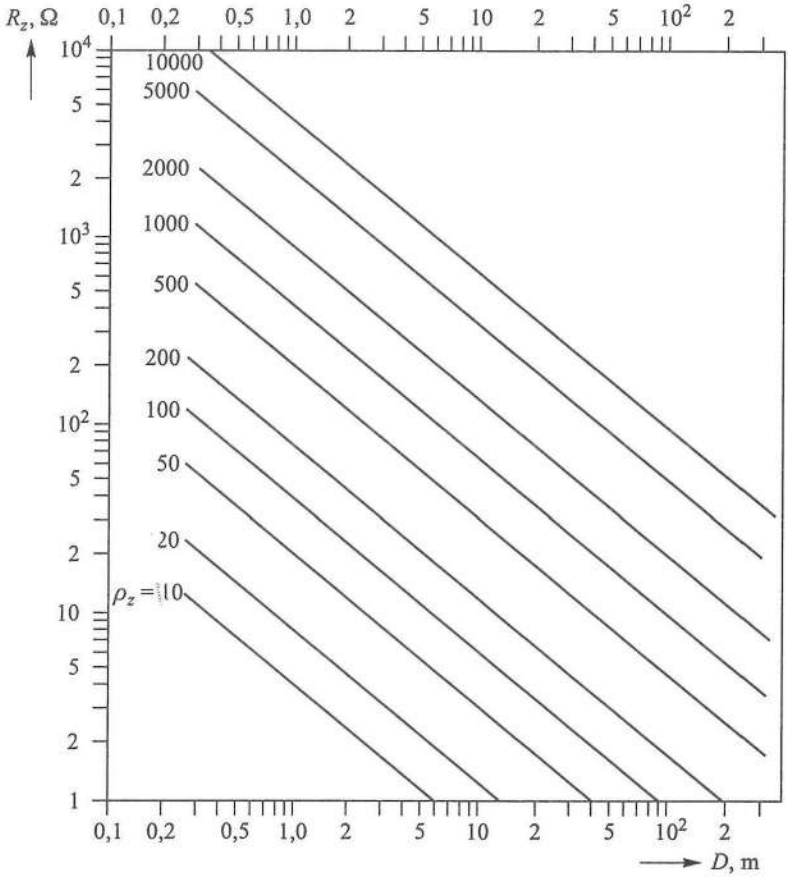
Vrsta zemljišta \ Duljina krakova uzemljivača, l, m	ρ_z, Ωm	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
		R_z, Ω													
Modra glina	10	4,0	2,3	1,7	1,4	1,1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	11,9	7,1	5,1	4,1	3,4	1,9	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
Lapor, suhi treset	80	31,8	18,8	13,7	10,9	9,1	5,1	3,6	2,9	2,4	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3
Ilovača i glinasto zemljište	100	39,7	23,5	17,1	13,6	11,4	6,4	4,6	3,6	3,0	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6
Sitni, vlažni pijesak	150	59,6	35,3	25,7	20,4	17,0	9,6	6,8	5,4	4,5	3,8	3,3	2,9	2,7	2,4
Grubi, vlažni pijesak	200	79,4	47,1	34,2	27,2	22,7	12,8	9,1	7,1	6,0	5,0	4,4	3,9	3,6	3,2
Sitni, suhi pijesak	750	297,8	176,5	128,4	162,0	85,2	48,1	34,2	26,8	22,5	18,9	16,6	14,8	13,3	12,2
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	397,1	235,3	171,2	136,0	113,6	64,1	45,6	35,7	30,0	25,3	22,1	19,7	17,8	16,2
Kamenito zemljište	3000	1191	706,0	513,7	408,2	340,8	192,4	137,0	107,2	90,0	75,8	66,4	59,1	53,4	48,7

* Za trokraki površinski uzemljivač za l se uzima duljina jednog kraka

Tablica P7–3. Nastavak.

Duljina krakova uzemljivača, l, m / Vrsta zemljišta	ρ_z, Ωm	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
		R_z, Ω														
Modra glina	10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Lapor, vlažni treset i močvarna zemlja	30	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Lapor, suhi treset	80	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Ilovača i glinasto zemljište	100	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
Sitni, vlažni pijesak	150	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1
Grubi, vlažni pijesak	200	3,0	2,6	2,6	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5
Sitni, suhi pijesak	750	11,2	10,4	9,7	9,1	8,6	8,1	7,7	7,3	6,9	6,6	6,4	6,1	6,0	5,7	5,5
Grubi, suhi pijesak ili suhi šljunak	1000	15,0	13,9	12,9	12,1	11,4	10,8	10,2	9,7	9,3	8,9	8,5	8,1	8,0	7,5	7,3
Kamenito zemljište	3000	44,8	41,6	38,8	36,3	34,2	32,3	30,7	29,2	27,8	26,6	25,5	24,4	24,0	22,5	21,9

3.8. Za pojedine vrste uzemljivača u tablicama od P7–1 do P7–3 dani su otpori rasprostiranja koji se prema vrsti zemljišta i duljinama uzemljivača mogu očekivati, te potrebne duljine uzemljivača prema zahtijevanim otporima uzemljenja. U prvoj aproksimaciji mogu biti izjednačeni otpori rasprostiranja s otporima uzemljenja.
Na slici P7–2 dan je očekivani otpor rasprostiranja prstenastih uzemljivača za istosmjernu i tehničku izmjeničnu struju.



Sl. P7–2. Prstenasti uzemljivač: očekivani otpor rasprostiranja [(uzemljenja)] R_z za jednosmjernu i tehničku izmjeničnu struju. Te vrijednosti u prvoj aproksimaciji mogu se uzeti i za okrugli čelik promjera $d = 8$ mm.

3.9. U načelu treba koristiti dubinske uzemljivače. Ako pobijanje dubinskih uzemljivača nije moguće ili nije svrsishodno (ako npr. postoji mogućnost da se u postojeći kabelski rov položi uzemljivač), treba položiti površinski uzemljivač. To treba primjenjivati kada istodobno polaganje površinskih uzemljivača

u kabelske rovove ili cijevi kabelske kanalizacije dovodi u odnosu na dubinske uzemljivače do uštede troška. Ako primjena jednog od dviju vrsta uzemljivača ne dovede do potrebne vrijednosti otpora, treba kombinirati oba načina.

3.10. Prstenasti ili mrežasti uzemljivači ugrađuju se samo, kada se s dubinskim, jednokrakim ili višekrakim površinskim uzemljivačima ili kombiniranim uzemljivačima ne može postići tražena vrijednost otpora uzemljenja.

3.11. Ako se mjerenjem specifičnog otpora zemljišta ustanovi da su dublji slojevi zemljišta slabije provodni od gornjih slojeva, radi poboljšanja otpora rasprostiranja potrebno je postaviti više dubinskih uzemljivača, odnosno kombinirani uzemljivač. Ukoliko se postavlja više dubinskih uzemljivača tada treba zbog međusobnih utjecaja najmanja udaljenost između pojedinih uzemljivača biti jednaka dvostrukoj dubini pojedinačnih dubinskih uzemljivača. Ako je gornji dio dubinskog uzemljivača u sasušenom ili zaleđenom gornjem sloju zemlje, kada ne djeluje čitava dubina uzemljivača, međusobna udaljenost treba biti veća od dvostruke duljine radnog dijela uzemljivača. Sve uzemljivače treba međusobno u zemlji galvanski povezati.
Ako se postavlja više dubinskih uzemljivača, ukupni otpor može se približno izračunati iz paralelne veze pojedinih otpora rasprostiranja:

$$R_z = \frac{1}{\frac{1}{R_{z1}} + \frac{1}{R_{z2}} + \cdots + \frac{1}{R_{zn}}} \quad (\Omega)$$

3.12. Otpor uzemljenja kombiniranih uzemljivača zbog međusobnog utjecaja nije moguće točno proračunati. Ipak se s dovoljnom točnošću može izračunati te otpore, ako se promatra posebno prvo dubinski, a potom površinski uzemljivač. Pri tome treba uzeti u potpunosti onaj otpor rasprostiranja koji se očekuje s dubinskim uzemljivačem, a samo djelomično otpor rasprostiranja koji se očekuje s površinskim uzemljivačem. Kod površinskog uzemljivača treba pri izračunavanju njegove stvarne duljine odbiti vrijednost koja odgovara polovici duljine dubinskog uzemljivača. Ukupna otpornost uzemljenja proračunava se tada iz paralelne veze tako izračunanih pojedinačnih otpora uzemljenja.

P7.4. Opće o izradi uređaja za uzemljenje

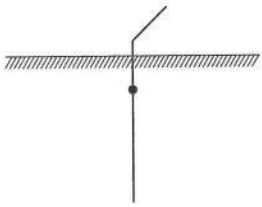
4.1. Opće upute

Vrstu, oblik i veličinu uređaja za uzemljenje treba odrediti prema odsječku P7.3.
Kao vrste uzemljivača mogu se upotrijebiti dubinski (štapni) uzemljivači, površinski (trakasti ili od okruglog čelika) uzemljivači, pločasti uzemljivači ili kombinirani uzemljivači. Koji će se uzemljivač primijeniti ovisi o mjesnim okolnostima, geološkom sastavu zemljišta i cijeni.
Pri ugrađivanju uzemljivača i zemljovoda ne smiju biti oštećeni podzemni uređaji. U agresivnom zemljištu uzemljivače ne treba postavljati, u protivnom mora se upotrijebiti nehrđajući materijal ili uzemljivač sa što je mogućno većim presjekom.

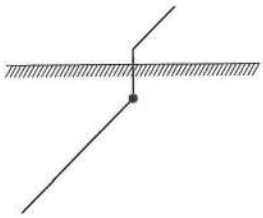
4.2. Dubinski uzemljivači

Za izradu dubinskih uzemljivača upotrebljavaju se čelične cijevi pocinčane toplim postupkom. Najmanje su dimenzije dubinskog (štapnog) uzemljivača: vanjski promjer 25 mm i duljine 1,5 m.

Dubinske uzemljivače treba po mogućnosti pobijati uspravno u zemlju (slika P7–3). Ako geološki ili koji drugi razlozi to zahtijevaju, dubinski uzemljivači mogu biti pobijeni i koso (slika P7–4).



Sl. P7–3. Vertikalno pobijen dubinski uzemljivač.



Sl. P7–4. Koso pobijen dubinski uzemljivač.

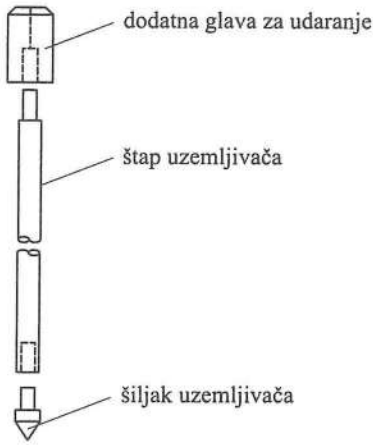
Za radno i kombinirano radno i zaštitno uzemljenje treba prvo pobiti određeni broj uzemljivačkih štapova, koji proizlaze iz tablice P7–1. Nakon toga treba izmjeriti otpor uzemljivača. Ako zahtijevana vrijednost još nije postignuta, treba ugraditi dodatne štapove.

Štapovi uzemljivača mogu biti pobijeni u zemlju strojno ili ručno. Prvi štap treba biti opremljen šiljkom uzemljivača. Za vrijeme pobijanja gornji kraj štapa treba štititi od deformacija postavljanjem dodatne glave za udaranje (slika P7–5).

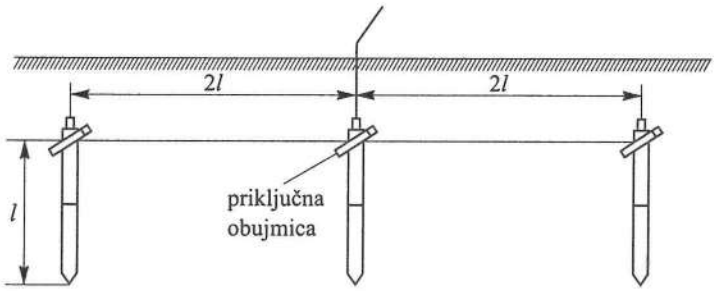
Najmanja međusobna udaljenost uzemljivača treba biti jednaka dvostrukoj duljini pojedinačnih uzemljivača (slika P7–6).

Nakon pobijanja dubinskog uzemljivača mora gornji kraj uzemljivača ležati najmanje 0,6 m ispod površine zemlje. Stoga prije pobijanja štapova uzemljivača treba na mjestu pobijanja iskopati rupu odgovarjuće dubine (slika P7–7).

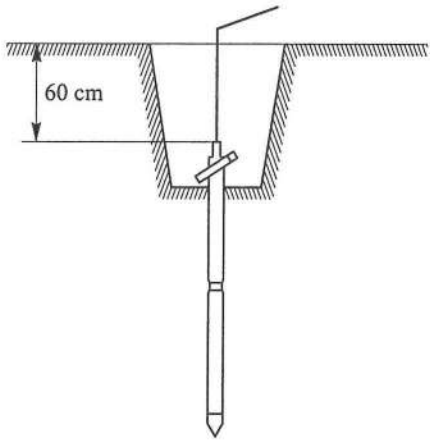
Kod zgrada bez uzemljivača temelja ili kod stupova dubinski uzemljivači mogu biti ugrađeni neposredno uz zid zgrade ili uz stup. U tom slučaju oni smiju viriti iz zemlje oko 20 cm (slika P7–8).



Sl. P7–5. Štap uzemljivača s dodatnom glavom za udaranje i šiljkom uzemljivača.



Sl. P7–6. Najmanja udaljenost kod više dubinskih uzemljivača.



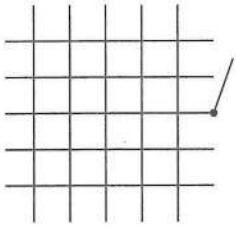
Sl. P7–7. Dubinski uzemljivač.

Sl. P7–8. Prstenasti uzemljivač.

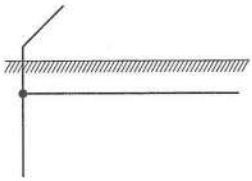
Pri vrhu gornjeg štapa treba kod dubinskog uzemljivača postaviti priključnu obujmicu na koju će biti spojeni vodovi koji međusobno spajaju uzemljivače te zemljovod.
Spojne vodove i zemljovod treba položiti na dubinu od 0,6 m.
Ako se uzemljenje izvodi na privatnim posjedima i posjedima koji se obrađuju, treba pobiti gornji kraj uzemljivača najmanje 1,2 m duboko, a zemljovod položiti na dubini od 1,2 m.
Ako se dubinski uzemljivači grade radi zaštite od udara groma, tada ih treba predvidjeti na mjestima na koja se pri oluji u principu neće sklanjati ljudi ili životinje (npr. ne ispred kućnih ulaza, kapija, pojilišta za stoku i sl.).

4.3. Površinski uzemljivači

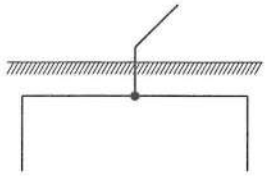
Površinski uzemljivači sastoje se od jednokračnih i višekračnih uzemljivača. Više od tri kraka ne predviđaju se zbog međusobnih utjecaja. Površinski uzemljivači izrađuju se od toplo pocinčanoga okruglog čelika promjera $d = 8$ mm ili od toplo pocinčane čelične vrpce najmanjeg poprečnog presjeka 75 mm^2 (slike P7–9 do P7–12). Otpori uzemljenja i potrebne duljine površinskih uzemljivača dane su u tablicama P7–2 i P7–3.



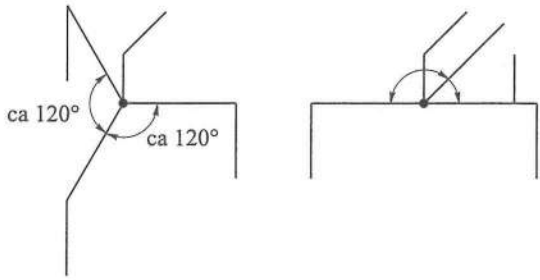
Sl. P7–9. Uzemljivač u obliku mreže.



Sl. P7–10. Dubinski uzemljivač i jednokračni površinski uzemljivač.



Sl. P7–11. Dva dubinska uzemljivača i dvostruki površinski uzemljivač.



Sl. P7–12. Tri dubinska uzemljivača i trokračni površinski uzemljivač.

Površinski uzemljivači mogu u specijalnim slučajevima biti prstenasti ili u obliku mreže (slike P7–8 i P7–9). O otporima uzemljenja i potrebnim duljinama prstenastih uzemljivača vidi sliku.

Za uzemljene zaštite od udara groma potrebno je da udarni otpor rasprostiranja ne bude veći od 20 oma, kada specifični otpor tla nije veći od 250 om metara ili 8 % od vrijednosti specifičnog otpora tla kada je on veći od 25 om metara.

Za radna i kombinirana radna i zaštitna uzemljenja treba prvo položiti onu duljinu površinskog uzemljivača koja proizlazi iz tablice P3–2 i tek tada zatrpati rovove. Ako se mjerenjem utvrdi da tražena vrijednost otpora uzemljenja još nije postignuta, tada uzemljivač treba produžiti ili ga dopuniti s višekračnim uzemljivačem ili dubinskim uzemljivačem.

Površinske uzemljivače treba polagati na dubinu od 0,6 m u što je moguće bolje provodno i od mreža zaštićeno zemljište. U zemljištu koje se upotrebljava za poljoprivredu uzemljivač se polaže na dubini od 1,2 m.

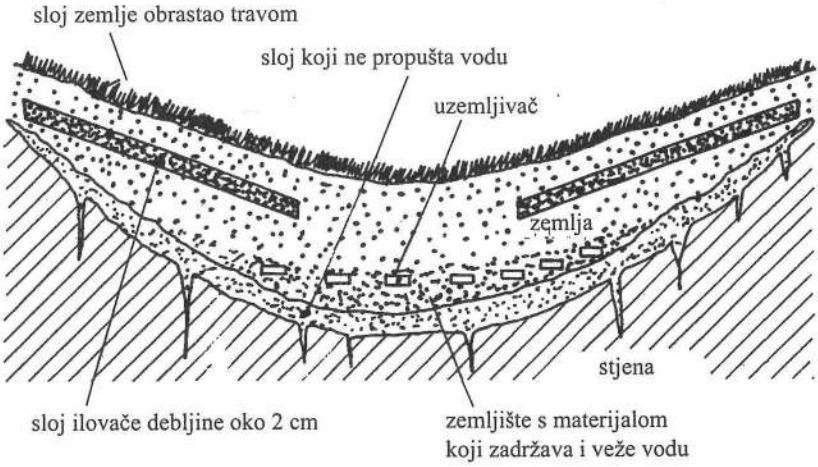
Površinske uzemljivače treba po mogućnosti položiti pravocrtno, pri čemu treba izbjegavati valovito i krivudava polaganja, te oštra savijanja. Površinski uzemljivači ne smiju biti položeni u močvarno zemljište.

Kod uzemljivača s više krakova (slike P7–6 i P7–7) kutove između krakova treba po mogućnosti izabrati tako da budu iste veličine, a pojedini krakovi trebaju biti iste duljine.

Zemljište iznad površinskog uzemljivača treba dobro nabiti kako bi se osigurala trajna i dobra provodna veza s uzemljivačem.

Kod zajedničkog polaganja podzemnih kabela i površinskih uzemljivača međusobna udaljenost treba iznositi od 0,1 m do 0,2 m. Površinske uzemljivače treba završiti tako da se njihovi krajevi odvedu što je mogućno dalje od kabela,

odnosno kabelskog rova. U kabelskim rovovima treba izbjegavati križanje uzemljivača s kabelima kako pri nabijanju zemljišta kabel ne bi bio oštećen. Ako za uređaj za uzemljenje ne postoji dovoljno zemljišta, npr. u planinskim područjima, ili je zemljište s malom provodnošću, otpornost uzemljenja može se poboljšati i načinom gradnje kao na slici P7–13.



Sl. P7–13. Način ugradnje uzemljenja pri maloj provodnosti zemljišta.

4.4. Pločasti uzemljivači

Za izradu pločastih uzemljivača upotrebljava se ploča od čeličnog lima pocinčanog toplim postupkom ili bakrena ploča.

Pločasti uzemljivači rjeđe se upotrebljavaju (samo za izradu uzemljivača za osiguračke slogove kod pretplatnika za kutije za dvojne priključke).

Uzemljivači za pretplatničke osiguračke slogove i kutije za dvojne priključke izrađuju se od čelične ploče najmanjih dimenzija 500 × 500 × 1,5 mm ili odobrenih najmanjih dimenzija 500 × 500 × 1 mm. Za uzemljivače skupnih osiguračkih sklopova upotrebljavaju se čelične ploče najmanjih dimenzija 500 × 100 × 1,5 mm ili bakrene ploče 500 × 100 × 1 mm.

Pločasti uzemljivači ukopavaju se uspravno u zemlju, gornji rub ploče mora biti najmanje 1 m duboko u zemlji. Otpornost rasprostiranja pločastog uzemljivača kvadratnog oblika može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$R_{zp} = \frac{1}{4 \cdot l} \quad \Omega$$

gdje je:

l duljina ploče, m

Kada se u zemlju polaže više pločastih uzemljivača, njihova međusobna udaljenost mora iznositi najmanje 3 m.

4.5. Kombinirani uzemljivači

Kombinirani uzemljivači izrađuju se u slučajevima kada se s pomoću dubinskih ili površinskih uzemljivača ne mogu dobiti potrebne vrijednosti otpornosti uzemljenja.
Kombinirani uzemljivači sastoje se od dubinskih i površinskih uzemljivača (slike P7–10 do P7–12).

4.6. Zemljovodi

Za zemljovode upotrebljava se toplo pocinčani okrugli čelik, toplo pocinčana čelična vrpca, golo bakreno uže i goli ili izolirani bakreni vodič (jednožilni ili višežilni).
Zemljovode treba polagati bez oštrih krivina i po najkraćem putu od uzemljivača do uređaja koji se uzemljuje, odnosno do sabirnog voda za uzemljenje.
Zemljovod treba biti u stalnom padu prema zemlji.
Zemljovode u zgradama i na njima u načelu treba polagati na malteru i pričvrstiti ih obujmicama. Oni mogu biti uvučeni i u plastične cijevi (npr. kod polaganja ispod maltera i kod prolaza kroz zid). Nije dopušteno polaganje zemljovoda izravno u zid ili kroz čelične cijevi. Nije dopuštena ugradnja osigurača ili prekidača u zemljovode.
Zemljovode treba mehanički zaštititi na prolazima kroz zidove i na mjestima gdje su izloženi mehaničkom oštećenju. Ti zaštitnici moraju biti lako odstranjivi, spojna i priključna mjesta moraju biti dostupna.
Spojevi kod zemljovoda i između zemljovoda i uzemljivača moraju biti mehanički sigurno izvedeni i moraju omogućavati dobru provodnu vezu.
Vrsta materijala za zemljovod ovisi o vrsti uzemljenja i mjestu i načinu postavljanja zemljovoda. U tablici P7–4 navedeni su zemljovodi koje treba primjenjivati u tt mrežama.
Za izolirane zemljovode treba upotrijebiti izolaciju žute boje sa zelenom crtom.

4.7. Spojevi

Spojeve treba izvesti spajanjem sa zavrtnjima ili stezaljkama, te tiještenjem ili lemljenjem. Prije postavljanja obujmica, stezaljki ili konektora treba s cijevi, štapova ili vodiča u području mjesta spajanja skinuti izolaciju odnosno dobro ih očistiti.
U zemljištu sve spojeve različitih metala (npr. bakra na pocinčani uzemljivač) treba zaštititi od učinka korozije navlačenjem termoskupljajuće cijevi. Pri spajanju istih metala kao zaštita od korozije zadovoljava premazivanje spoja specijalnom masom za punjenje. Izvan zemljišta treba zaštititi od korozije samo zalemljene spojeve.
Ostali materijali koji se upotrebljavaju pri izradi uzemljenja, te spojni materijali (obujmice, stezaljke, konektori, ukrasni dijelovi) moraju odgovarati ovoj uputi i hrvatskim normama za tu vrstu materijala.

Tablica P7–4.

Red. br.	Između	Pri spoju	Upotrijebiti sljedeće zemljovode
1	2	3	4
1.	Uzemljivača (npr. dubinski uzemljivač)	sabirnog zemljovoda (prstenasti vod ili tračnica)	
2.	Postolja završnih kabelskih nastavaka		
3.	Postolja završnih kabelskih nastavaka	postolja završnih kabelskih nastavaka	Izolirani bakreni vodič presjeka 70 mm^2
4.	Armature kabela u izvedbi sa zaštitom od udara groma	sabirnog zamljovoda (prstenasti vod ili tračnica)	
5.	Čeličnih cijevi ili valovitih bakrenih cijevi	čeličnih cijevi ili valovitih bakrenih cijevi	
6.	Čeličnih cijevi ili valovitih bakrenih cijevi	sabirnog zamljovoda (prstenasti vod ili tračnica)	Izolirani bakreni vodič presjeka 16 mm^2
7.	Završnih spojnica	postolja završnih kabelskih nastavaka	
8.	Omotača kabela	postolja završnih kabelskih nastavaka	
9.	Kabelskih metalnih uvodnica	sabirnog zamljovoda (prstenasti vod ili tračnica)	
10.	Priključnih stezaljki zemljovoda od: – linijskih razdjelnika – kabelskih razdjelnika – pojačivača	uzemljivača	Okrugli čelik promjera 8 mm ili čelična pocinčana vrpca presjeka 75 mm^2
11.	Nosećeg užeta samonosivih kabela	uzemljivača	Nikakav posebni zemljovod (noseće uže samonosivih kabela izravno se spaja s okruglim čelikom promjera 8 mm ili čeličnom vrpcom presjeka 75 mm^2 postavljenom uz uporište)
12.	Oplata samonosivog kabela	zemljovoda od pocinčane čelične vrpce presjeka 75 mm^2 postavljenog uz uporište	

Tablica P7–4. Nastavak

1	2	3	4
13.	Priključnih stezaljki zemljovoda razdjelnika i koncentratora	priključnih stezaljki zemljovoda ormara za koncentratore ili priključnih motora	
14.	Priključnih stezaljki zemljovoda na stupu postavljenih dvojničkih kutija ili – kabelskih izvoda – spojnica za nastavljanje samonosivih kabela – spojnica za nastavljanje samonosivih kabela s prenaponskom zaštitom	na stupu izvedenog okruglog čelika ili čelične vrpce	izolirani bakreni vodič presjeka 2,5 mm^2
15.	Priključnih stezaljki zemljovoda sporednih pretplatničkih uređaja	izjednačava potencijale kod pretplatnika, stezaljki izjednačivača potencijala ili uzemljivača po zgradama	
16.	Priključnih stezaljki dvojničkih kutija u zgradi	izjednačavanje potencijala pretplatnika ili stezaljke izjednačivača potencijala	
17.	Priključnih stezaljki zemljovoda kućnih priključaka	završnih spojnica	izolirani bakreni vodič presjeka 4 mm^2
18.	Omotača kabela od metala ili ekrana (unutar završne spojnice)		golo pokositreno bakreno uže presjeka 6 mm^2
19.	Međusobno povezivanje omotača od metala, odnosno ekrana kabela unutar spojnice od		izolirano bakreno uže presjeka 6 mm^2, odnosno 2,5 mm^2
20.	Omotača kabela uvedenih u linijski i kabelski razdjelnik	priključnih stezaljki za uzemljenje razdjelnika	izolirani bakreni vodič presjeka 2,5 mm^2
21.	Pretplatničkih osiguračkih slogova	uzemljivača	
22.	Kabelske glave za unutrašnju montažu bez osigurača	uzemljivača	

Tablica P7–4. Nastavak

1	2	3	4
23.	Skupnih osiguračkih slogova	uzemljivača	izolirani bakreni vodič presjeka 2,5 mm^2 za kraće zemljovode ili pocinčani okrugli čelik promjera 8 mm, odnosno pocinčana čelična vrpca presjeka 75 mm^2 za dulje zemljovode
24.	Priključnih stezaljki zemljovoda od: – kabelskih izvoda – nastavaka na samonosivom kabelu – priključne spojnice	sporednih telefonskih priključaka (stezaljki za uzemljenje razvodne kutije) ili priključne stezaljke zemljovoda dvojničke kutije	izolirani bakreni vodič presjeka 2,5 mm^2 ili jedna parica instalacijskog kabla (dopušteno jedino za radno uzemljenje)

P7.5. Izrada uređaja za uzemljenja

5.1. Spajanje postolja završnih kabelskih nastavaka

Sastavni dijelovi postolja završnih kabelskih nastavaka (podužne i poprečne tračnice) moraju biti međusobno električno dobro provodno povezani (zavarivanjem ili spajanjem zavrtnjima).

Kod postolja završnih kabelskih nastavaka sa slojem premazanog materijala treba upotrijebiti i nazubljeni podmetač.

Između više postolja završnih kabelskih nastavaka, kao i od postolja završnoga kabelskog nastavka do sabirnog voda za uzemljenje treba za zemljovod upotrijebiti izolirani bakreni vodič presjeka 70 mm^2. Priključivanje bakrenih vodiča na postolje završnih kabelskih nastavaka treba izvesti s pomoću kabelskih papučica, zavrtnjeva M8 i podmetača.

P8. Izvod iz Pravilnika o zaštiti na radu pri korištenju električne energije (Narodne novine br. 9/87) za područje uzemljenja

Članak 86.

Uzemljenje i kratko spajanje provodi se zemljospojnikom ili prijenosnom napravom za uzemljenje i kratko spajanje.

Izbor presjeka užeta prenosnih naprava za uzemljenje i kratko spajanje provodi se prema tablici P8–1.

Uže mora biti izrađeno od tankih bakrenih žica.

Stezaljke moraju biti tako dimenzionirane da izdrže očekivana termička i dinamička naprezanja struje kratkog spoja.

Tablica P8-1.

Presjek bakrenog užeta, mm^2	Najveća struja kratkog spoja, kA – trajanje u sekundama –					
	10	5	2	1	0,5	0,2
16	1,0	1,4	2,2	3,2	4,4	7,0
25	1,5	2,2	3,5	5,1	6,8	11,0
35	2,2	3,1	4,8	7,0	9,6	15,4
50	3,1	4,3	7,0	10,0	14,0	22,0
70	4,3	6,0	9,5	14,0	19,5	30,8
95	5,8	8,3	13,0	18,5	26,5	41,9
120	7,5	10,5	16,5	23,5	33,5	52,9
150	9,2	13,0	21,0	29,5	42,0	66,1

Članak 87.

Na vodovima napona iznad 1 kV dopuštena je primjena bakrenog užeta presjeka 25 mm^2 u prijenosnim napravama za uzemljenje i kratko spajanje na mjestu rada ako je vod identificiran i ako je na svim krajevima voda odakle bi mogao prodrijeti pogonski napon izvedeno uzemljenje i kratko spajanje napravama koje su dimenzionirane da izdrže očekivane struje kratkog spoja.

Članak 88.

Uzemljene metalne konstrukcije mogu se upotrijebiti za uzemljenje i kratko spajanje ako imaju ekvivalentan presjek prema tablici iz članka 86. ovog pravilnika i ako su spojevi u konstrukciji dobro vidljivi.

Članak 89.

Prijenosne naprave za uzemljenje i kratko spajanje koje su bile izložene struji kratkog spoja ne smiju se više upotrijebiti.

Članak 90.

U prostorijama visokih napona, u kojima postoji mogućnost induciranja napona zbog elektrostatičkih i elektromagnetskih utjecaja treba metalne skele, dizalice, prijenosna sredstva i ostale dugačke vodljive predmete privremeno uzemljiti bakrenim vodičem presjeka 16 mm^2 radi odvođenja induciranih napona.

P9. Izvod iz hrvatske norme HD 637 S1:1999 (prihvaćena kao hrvatska norma HRN HD 637 S1:2002), Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, za područje uzemljenja

P9.2 Definicije

P9.2.7 Uzemljenje

2.7.1 **zemlja**: Pojam označuje zemlju kao mjesto i zemlju kao vodljivi materijal, npr. primjeri vrsta zemlje su humus, ilovača, pijesak, šljunak i kamen. (IEV 826-04--01)

2.7.2 **referentna zemlja (daleka zemlja)**: Dio zemlje izvan područja utjecaja uzemljivača ili uzemljivačkog sustava gdje se između bilo kojih dviju točaka ne pojavljuje nikakav napon uslijed struje prema zemlji. Općenito se smatra površinom zemlje. (IEV 604-04-05)

2.7.3 **uzemljivač**: Vodič koji je u vodljivome dodiru sa zemljom ili vodič položen u beton i koji je velikom površinom u dodiru sa zemljom (npr. temeljni uzemljivač). (IEV 904-04-05, 826-04-02)

2.7.4 **zemljovod**: Vodič koji dio postrojenja koji treba uzemljiti spaja s uzemljivačem ili koji međusobno spaja uzemljivače, bilo da je izvan zemlje ili da je izoliran položen u zemlju. (IEV 826-04-07)

Napomena: Ako je spajanje dijela postrojenja i uzemljivača izvedeno preko rastavne spojnice, rastavne sklopke, brojila odvodnika prenapona ili iskrišta odvodnika prenapona itd., vodičem za uzemljenje smatra se samo dio spoja koji je trajno spojen s uzemljivačem.

2.7.5 **vodič za izjednačenje potencijala**: Vodič koji omogućuje izjednačenje potencijala. (IEV 826-04-10)

2.7.6 **uzemljivački sustav**: Mjesno ograničen sustav vodljivo spojenih uzemljivača ili metalnih dijelova jednake učinkovitosti (npr. temelji stupova, armature kabela, metalni plaštevi kabela), vodiča za uzemljenje i vodiča za izjednačenje potencijala. (IEV 604-04-01)

2.7.7 **uzemljiti**: Električno vodljivi dio spojiti sa zemljom preko uzemljivačkog sustava. (IEV 604-04-01)

2.7.8 **uzemljenje**: Ukupnost svih sredstava i mjera za uzemljenje.

2.7.9 **Vrste uzemljivača**

2.7.9.1 **vodoravni uzemljivač**: Uzemljivač koji je općenito položen na maloj dubini do oko 1 m. To npr. može biti traka, okrugla šipka ili uže, a može se izvesti kao zrakasti, prstenasti ili mrežasti uzemljivač ili kao njihova kombinacija.

2.7.9.2 **štapni uzemljivač**: Uzemljivač koji je općenito ukopan ili zabijen na dubinu veću od 1 m. To npr. može biti cijev, okrugla šipka ili materijal drugačijeg profila. (IEV 604-04-09)

2.7.9.3 **kabel s uzemljivačkim učinkom**: Kabel čiji plaštevi, zasloni ili armature imaju isti učinak kao trakasti uzemljivač.

2.7.9.4 **temeljni uzemljivač**: Vodljivi konstrukcijski dio koji je položen u beton i koji je velikom površinom u vodljivom dodiru sa zemljom.

2.7.9.5 **uzemljivač za oblikovanje potencijala**: Vodič koji se s obzirom na njegov razmještaj ne primjenjuje radi postizanja određenog otpora uzemljenja, nego u prvome redu radi oblikovanja potencijala.

2.7.9.6 **prirodni uzemljivač**: Metalni dio koji je, izravno ili preko betona, u vodljivome dodiru sa zemljom ili vodom čija prvotna namjera nije uzemljenje, ali koji, bez štete za prvotnu namjenu, zadovoljava sve zahtjeve za uzemljivač.

Napomena: To su npr. cjevovodi, čelična užad, armatura armiranoga betona, čelična konstrukcija zgrade itd.

2.7.10 **Vrste otpora**

2.7.10.1 **specifični otpor tla** (ρ_E): Specifični električni otpor tla.

2.7.10.2 **otpor uzemljenja** (R_E) **(uzemljivača)**: Otpor zemlje između uzemljivača i referentne zemlje (vidjeti sliku P9–1).

2.7.10.3 **impedancija uzemljenja** (Z_E) **(uzemljivačkog sustava)**: Impedancija između uzemljivačkog sustava i referentne zemlje.

Napomena: Impedancija uzemljenja ovosi o izravno spojenim uzemljivačima i o zaštitnim užadima nadzemnih vodova, kabelima s uzemljivačkim učinkom te o drugim uzemljivačkim sustavima koji su vodljivim kabelskim plaštovima, zaslonima PEN vodičima ili na drugi način spojeni na dotični uzemljivački sustav.

2.7.11 **Vrste uzemljenja**

2.7.11.1 **zaštitno uzemljenje**: Uzemljenje vodljivoga dijela koji ne spada u aktivne dijelove radi zaštite ljudi od električnog udara.

2.7.11.2 **uzemljenje sustava**: Uzemljenje neke točke aktivnoga kruga koje je potrebno radi pravilnog rada opreme ili stanica [ustaljen je naziv: pogonsko ili radno opterećenje].

2.7.11.3 **uzemljenje za zaštitu od groma**: Uzemljenje za odvođenje struje groma u zemlju [impulsno ili gromobransko uzemljenje].

2.7.12 **Razredba sustava s obzirom na način postupanja s neutralnom točkom**

2.7.12.1 **sustav s neuzemljenom neutralnom točkom**: Sustav kod kojeg neutralne točke transformatora i generatora nisu namjerno uzemljene, uz iznimku visokoimpedantnih uzemljenja za signalizaciju, mjerenje ili zaštitu. (Preinačeni IEV 601--02-04)

2.7.12.3 **sustav s neutralnom točkom uzemljenom preko male impedancije**: Sustav kod kojeg je najmanje jedna neutralna točka nekoga transformatora, transformatora za uzemljenje ili generatora uzemljena izravno ili preko impedancije koja je dimenzionirana tako da kod zemljospoja na bilo kojemu mjestu veličina struje kvara jamči pouzdanu proradu zaštite [neutralna točka uzemljena preko malog otpora s ograničenjem struje zemljospoja na 150 A ili 300 A]. (IEV 601--02-25, 601-02-26)

2.7.13 **Naponi u vezi s uzemljivačkim sustavima**

2.7.13.1 **potencijal uzemljenja** (U_E): Napon između uzemljivačkog sustava i referentne zemlje (vidjeti sliku P9–1).

2.7.13.2 **potencijal površine zemlje** (φ): Napon između neke točke na površini zemlje i referentne zemlje (vidjeti sliku P9–1).

2.7.13.3 **napon dodira** (U_T): Dio potencijala uzemljenja uslijed zemljospoja koji može premostiti čovjek uz pretpostavku da struja kroz ljudsko tijelo teče od ruke pre-

ma stopalu (vodoravni razmak od dostupnoga dijela je 1 m) [dodirni napon]. (IEV 826-02-02)

2.7.13.4 **napon napajanja za dodir** (U_{ST}) **(očekivani napon dodira)**: Napon koji pri zemljospoju postoji između vodljivih dijelova i zemlje kad se te dijelove ne dodiruje (napon napajanja).

2.7.13.5 **Napon koraka** (U_S): Dio potencijala uzemljenja uslijed zemljospoja koji može premostiti čovjek pri koraku od 1 m uz pretpostavku da struja kroz ljudsko tijelo teče od jednog stopala prema drugomu stopalu.

2.7.14 **Pojmovi u vezi s razlikama potencijala**

2.7.14.1 **izjednačenje potencijala**: Vodljivi spoj vodljivih dijelova radi smanjenja razlika potencijala između tih dijelova. (IEV 826-04-09)

2.7.14.2 **oblikovanje potencijala**: Oblikovanje potencijala zemlje, posebno potencijala površine zemlje, s pomoću uzemljivača (vidjeti sliku P9–1).

2.7.14.3 **preneseni potencijal**: Potencijal uzemljivačkog sustava izazvan strujom prema zemlji koji se preko spojenog vodiča (npr. metalni plašt kabela, PEN vodič, cjevovod, tračnica) prenosi u područje maloga ili nikakva potencijala prema referentnoj zemlji. To dovodi do razlika potencijala između tog vodiča i njegove okolice (vidjeti sliku P9–1). Definicija se odnosi i na vodič spojen s referentnom zemljom koja ulazi u područje potencijala.

2.7.14.4 **izoliranje mjesta posluživanja**: Mjera za povećanje otpora između poda i mjesta posluživanja radi sprečavanja premošćenja nedopuštenih napona.

2.7.14.5 **ukupni uzemljivački sustav**: Uzemljivački sustav ostvaren povezivanjem lokalnih uzemljivačkih sustava kod kojeg su s obzirom na blizinu lokalnih uzemljivačkih sustava otklonjeni opasni naponi dodira. Ti lokalni uzemljivački sustavi omogućuju podjelu struje zemljospoja kojom se postiže smanjenje potencijala pojedinoga lokalnog uzemljivačkog sustava. Tako nastaje kvazi ekvipotencijalna površina.

2.7.14.6 **dostupni vodljivi dio**: Vodljivi dio električne opreme koji se može dodirnuti i koji obično nije pod naponom, ali koji može doći pod napon u slučaju kvara. (IEV 826-03-02)

2.7.14.7 **strani vodljivi dio**: Vodljivi dio koji nije dio električnog postrojenja, a koji može privesti neki potencijal, i to općenito potencijal zemlje. (IEV 826-03-03)

2.7.14.8 **PEN vodič**: Uzemljeni vodič u niskonaponskome sustavu koji objedinjuje zadaće zaštitnog i neutralnog vodiča. (Preinačeni IEV 826-04-06)

2.7.15 **Pojmovi u vezi sa zemljospojem**

2.7.15.1 **zemljospoj**: Vodljivi spoj izazvan kvarom između faznog vodiča glavnoga strujnog kruga i zemlje ili uzemljenog dijela. Taj vodljivi spoj moguć je i preko luka. (IEV 151-03-40)

Zemljospojevi dvaju ili više faznih vodiča istog sustava na različitim mjestima nazivaju se dvostrukim ili višestrukim zemljospojevima.

2.7.15.2 **struja zemljospoja** (I_F): Struja koja na mjestu kvara (mjestu zemljospoja) teče iz glavnoga strujnog kruga prema zemlji ili uzemljenim dijelovima (vidjeti sliku P9–2 i sliku P9–3)

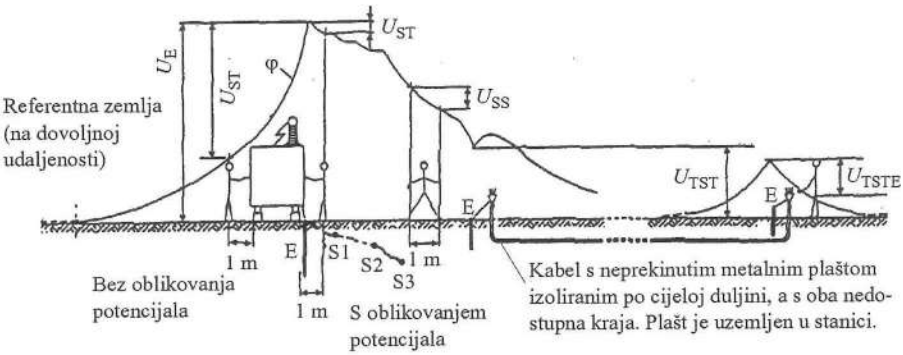
Kod jednog zemljospoja to je:

- u sustavima s neuzemljenom neutralnom točkom, kapacitativna struja zemljospoja I_C
- u sustavima s rezonantno uzemljenom neutralnom točkom, preostala struja zemljospoja I_{Res}
- u sustavima s neutralnom točkom uzemljenom preko male impedancije, struja jednopolnoga kratkog spoja I''_{k1}.

2.7.15.3 **struja prema zemlji** (I_E): Struja koja preko impedancije uzemljenja teče u zemlju (vidjeti sliku P9–2).

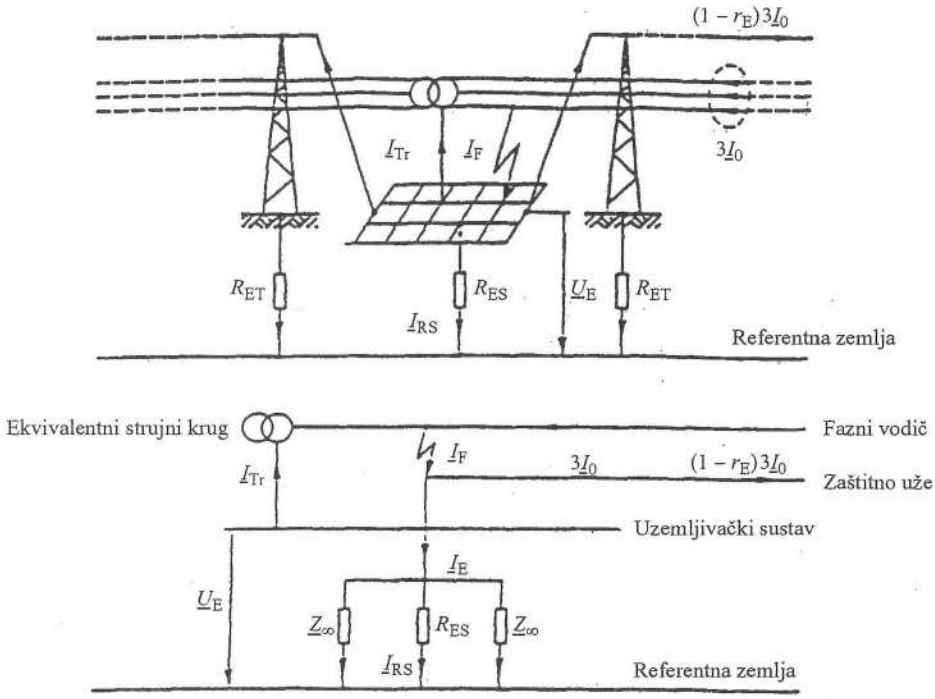
Napomena: Struja prema zemlji dio je struje zemljospoja I_F koji izaziva potencijal uzemljivačkog sustava. O određivanju I_E vidjeti i dodatak N.

2.7.15.4 **redukcijski faktor** (r): Faktor r trofaznog voda je omjer struje prema zemlji i zbroja nultih struja u faznim vodičima glavnoga strujnog kruga ($r = I_E/(3I_0)$) na mjestu udaljenu od mjesta kratkog spoja i od uzemljivačkog sustava postrojenja.



E	Uzemljivač
S1,S2,S3	Uzemljivači za oblikovanje potencijala (npr. prstenasti uzemljivači) spojeni s uzemljivačem E
U_E	Potencijal uzemljenja
U_{SS}	Napon napajanja za korak
U_{ST}	Napon napajanja za dodir
U_{TST}	Preneseni napon napajanja za dodir ako plašt nije uzemljen na udaljenome kraju
U_{TSTE}	Preneseni napon za dodir ako je plašt uzemljen i na udaljenom kraju
φ	Potencijal površine zemlje

Sl. P9–1. Primjer profila potencijala površine zemlje i napona u slučaju protjecanja struje kroz uzemljivače.



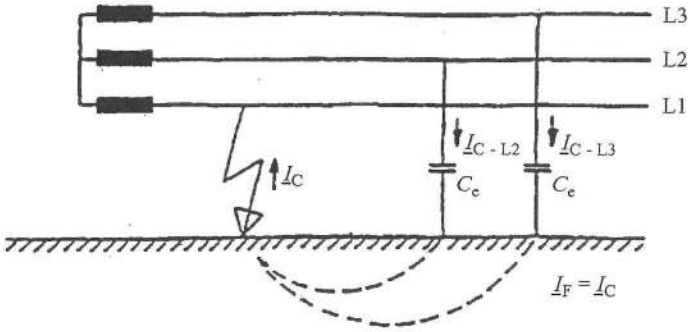
$$\underline{I}_F = 3\underline{I}_0 + \underline{I}_{Tr}$$
$$\underline{I}_E = r_E \cdot (\underline{I}_F - \underline{I}_{Tr})$$
$$\underline{U}_E = \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E$$

$$\underline{Z}_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + n\frac{1}{\underline{Z}_\infty}}$$

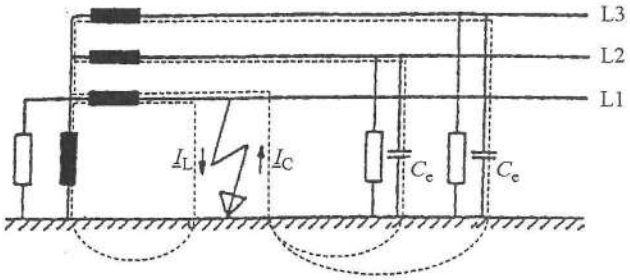
Za jednake impedancije temelja stupova nadzemnih vodova sa zaštitnim užetom

$3\underline{I}_0$	Trostruka nulta struja po fazi nadzemnog voda
$\underline{I}_{TR}$	Struja kroz uzemljenje neutralne točke transformatora
$\underline{I}_F$	Struja zemljospoja
$\underline{I}_E$	Struja prema zemlji (nije je moguće izravno mjeriti)
$\underline{I}_{RS}$	Struja kroz otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača
r_E	Redukcijski faktor nadzemnog voda
R_{ES}	Otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača
R_{ET}	Otpor uzemljenja stupa
$\underline{Z}_\infty$	Pretpostavljena beskonačno velika impedancija zaštitnog užeta / temelja stupova nadzemnog voda
$\underline{Z}_E$	Impedancija uzemljenja
$\underline{U}_E$	Potencijal uzemljenja
n	Broj nadzemnih vodova koji izlaze iz stanice (ovdje: $n = 2$)

Sl. P9–2. Primjeri struja, napona i otpora kod zemljospoja u transformatorskoj stanici s neutralnom točkom uzemljenom preko male impedancije.

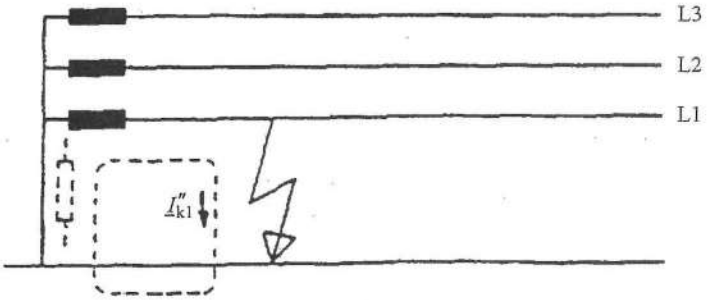


a) Struja zemljospoja u sustavu s neuzemljenom neutralnom točkom



$\underline{I}_F = \underline{I}_{RES} = (\underline{I}_C - \underline{I}_L) + \underline{I}_R + \underline{I}_H$

b) Struja zemljospoja u sustavu s rezonantno uzemljenom neutralnom točkom



$\underline{I}_F = \underline{I}''_{k1}$

c) Struja zemljospoja u sustavu s neutralnom točkom uzemljenom preko male impedancije

I_F	Struja zemljospoja
I_C	Kapacitivna struja zemljospoja
I_L	Zbroj struja paralelnih i kompenzacijskih prigušnica
I_R	Struja odvoda
I_H	Struja viših harmonika
I_{RES}	Preostala struja zemljospoja
I''_{k1}	Početna simetrična struja jednopolnoga kratkog spoja

Sl. P9–3. Bitne komponente struja zemljospoja u visokonaponskim sustavima.

P9.3 Temeljni zahtjevi

P9.3.1 Električni zahtjevi

3.1.4 **Struja kratkog spoja**

3.1.4.1 Postrojenja se moraju projektirati, izvesti i izgraditi tako da sigurno podnose mehaničke i toplinske učinke struje kratkog spoja.

3.1.4.2 Za svrhu ove norme u obzir se moraju uzeti pet vrsta kratkog spoja:

- tropolni kratki spoj
- dvopolni kratki spoj
- zemljospoj
- dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom
- dvostruki zemljospoj.

Postrojenja moraju biti zaštićana automatskim napravama za isklop dvopolnih kratkih spojeva.

Postrojenja moraju biti zaštićena automatskim napravama za isklop opasnih zemljospojeva ili za dojavljivanje zemljospoja. Izbor naprave ovosi o načinu postupanja s neutralnom točkom.

Napomena 1: Ako je primjerena vrijednost različita od 1,0 s, preporučene vrijednosti su 0,5 s i 3,0.

Napomena 2: Nazivno trajanje mora se odrediti uzimajući u obzir vrijeme isklopa kvara.

3.1.4.3 Normirana vrijednost nazivnoga trajanja kratkog spoja je 1,0 s.

3.1.4.4 Metode proračuna struja kratkog spoja u trofaznim sustavima dane su u HD 533.

3.1.4.5 Metode proračuna učinaka struje kratkog spoja dane su u EN 60865-1 i za energetske kabele u IEC 60949.

P9.9 Uzemljivački sustavi

P9.9.1 Svrha

Ova norma daje kriterije za projektiranje, izvedbu, ispitivanje i održavanje uzemljivačkog sustava koji će djelovati pri svim uvjetima i jamčiti sigurnost ljudskih života na svim mjestima na kojima je dopušten pristup. Osim toga, mora se zajamčiti kvalitetan spoj opreme s uzemljivačkim sustavom.

P9.9.2 Dimenzioniranje uzemljivačkih sustava za industrijsku frekvenciju

9.2.1 **Općenito**

Projekt uzemljivačkih sustava mora zadovoljiti četiri zahtjeva:

a) zajamčiti mehaničku čvrstoću i otpornost na koroziju
b) zajamčiti toplinsko podnošenje najveće struje kvara (koja se obično određuje proračunom)
c) izbjeći štetu za imovinu i opremu
d) zajamčiti sigurnost ljudi s obzirom na napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama zemljospoja.

Parametri mjerodavni za dimenzioniranje uzemljivačkog sustava jesu:

- vrijednost struje kvara[1)]
- trajanje kvara[1)]
- značajke tla.

Kod postrojenja s različitim naponskim razinama ta četiri zahtjeva moraju se zadovoljiti za svaki visokonaponski sustav. U obzir se ne moraju uzeti istodobni kvarovi u sustavima različitih napona.

Ti se zahtjevi ne odnose na privremena uzemljenja na mjestima rada i odvajanja.

9.2.2 **Dimenzioniranje s obzirom na koroziju i mehaničku čvrstoću**

9.2.2.1 **Uzemljivači**: Budući da su u izravnome dodiru s tlom, uzemljivači moraju biti od gradiva koji mogu podnijeti koroziju (kemijsko ili biološko djelovanje, oksidaciju, stvaranje elektrolitskih parova, elektrolizu itd.). Oni moraju biti otporni na mehaničke utjecaje pri ugradbi i na mehaničke utjecaje u normalnom pogonu. Prihvatljivo je kao dijelove uzemljivačkog sustava primijeniti čelik položen u betonske temelje, čelične pilote ili druge prirodne uzemljivače. S obzirom na mehaničku čvrstoću i koroziju najmanje dimenzije uzemljivača propisane su u dodatku A. Ako se primjenjuje drugo gradivo, npr. nehrđajući čelik, taj materijal i njegove dimenzije moraju zadovoljavati zahtjeve a) i b) iz podtočka 9.2.1.

9.2.2.2 **Zemljovod**: Iz mehaničkih i električnih razloga najmanji su presjeci:

- bakar: 16 mm^2 (ali vidjeti i F.5)
- aluminij: 35 mm^2
- čelik: 50 mm^2

9.2.2.3 **Vodiči za izjednačavanje potencijala**: Preporučuje se da vodiči za izjednačenje potencijala dimenzioniraju prema podtočki 9.2.2.2.

Napomena: Čelični vodiči za uzemljenje i čelični vodiči za izjednačenje potencijala zahtijevaju odgovarajuću zaštitu od korozije.

9.2.3 **Dimenzioniranje s obzirom na toplinsko naprezanje**

9.2.3.1 **Općenito**: Struje koje se moraju uzeti u obzir za vodiče za uzemljenje i uzemljivače utvrđene su u tablici P9–1.

Napomena 1: U nekim slučajevima moraju se pri dimenzioniranju uzemljivačkog sustava uzeti u obzir nulte struje u pogonu bez kvara.

Napomena 2: Pri projektiranju mora se za proračun dimenzija vodiča uzeti u obzir moguće buduće povećanje struja.

Često u uzemljivačkom sustavu dolazi do grananja struje kvara; zato je moguće svaki uzemljivač dimenzionirati samo za dio struje kvara.

9.2.4 **Dimenzioniranje s obzirom na napon dodira i koraka**

9.2.4.1 **Dopuštene vrijednosti**: Struja koja teče kroz ljudsko tijelo uzrok je opasnosti. IEC/TR2 60479-1 daje upute o učincima struje koja teče kroz ljudsko tijelo u

---

[1)] Ti parametri uglavnom ovise o načinu postupanja s neutralnom točkom visokonaponskog sustava

ovisnosti o veličini i trajanju te struje. U praksi je prikladnije oslanjati se na napone koraka. Granice napona dodira kod zemljospojeva dane su na slici P9–4. Krivulja na toj slici predstavlja vrijednost napona pod kojim može biti tijelo kad su ruke i noge gole. U proračunima nisu uzeti u obzir nikakvi dodatni otpori. Međutim radi uzimanja u obzir dodatnih otpora, npr. obuće i površinskih materijala velikog otpora, dopušteno je primijeniti proračune prema dodatku C.
Svaki će se zemljospoj isklopiti automatski ili ručno. Zato se kod zemljospojeva ne pojavljuju naponi dodira vrlo dugoga ili neograničenog trajanja.
Za napone koraka nije potrebno odrediti dopuštene vrijednosti.

Napomena: Dopuštene vrijednosti napona koraka nešto su veće od dopuštenih vrijednosti napona dodira. Zato se općenito može pretpostaviti da se opasni naponi koraka neće pojaviti ako uzemljivački sustav zadovoljava zahtjeve za napon dodira

Za mjerodavno trajanje kvara računa se s ispravnim djelovanjem zaštitnih naprava i sklopki.

9.2.4.2 **Mjere za poštovanje dopuštenih napona dodira**: Na osnovi prva tri zahtjeva iz podtočke 9.2.1 dolazi se do osnovnoga projekta uzemljivačkog sustava. Taj se projekt mora provjeriti s obzirom na napone dodira i može se smatrati tipskim projektom za slične prilike. Blok shema na slici P9–5 pokazuje opći pristup. Neki su primjeri toga pristupa u posebnim slučajevima, ovisno o povratnoj stazi struje kvara, dani u dodatku Q.

Moraju se primijeniti vrijednosti dopuštenih napona dodira U_{Tp} iz slike P9–4. Dodatni otpori mogu se uzeti u obzir prema dodatku C. Smatra se da su dopuštene vrijednosti ispunjene:

– ako je ispunjen jedan od uvjeta C:

C1: dotično postrojenje postaje dio ukupnog uzemljivačkog sustava;
C2: potencijal uzemljenja, određen mjerenjem ili proračunom, ne prelazi dvostruku vrijednost dopuštenog napona dodira prema slici P9–4;

ili

– ako su, u ovisnosti o potencijalu uzemljenja i trajanju kvara, provedene dotične priznate propisane mjere M koje su opisane u dodatku D.

Ako nije ispunjen ni jedan od uvjeta C ili ako nisu provedene dotične priznate mjere M, mora se, i to općenito mjerenjem, dokazati poštovanje dopuštenoga napona dodira U_{Tp} iz slike P9–4.

Alternativno se može primijeniti tipski projekt koji jamči potpuno ispunjavanje zahtjeva iz podtočke 9.2.1.

Napomena: Kao alternativa primjeni uvjeta C i priznatim propisanim mjerama M, vrijednosti napona dodira mogu se provjeriti mjerenjima na lokaciji.

Preneseni potencijali moraju se uvijek provjeriti zasebno.

Potencijal i naponi dodira uzemljivačkog sustava mogu se izračunati na osnovi dostupnih podataka (specifični otpor tla, impedancija uzemljenja postojećih

uzemljivačkih sustava, vidjeti dodatak K). Za proračun mogu se uzeti u obzir svi uzemljivači i drugi uzemljivački sustavi koji su pouzdano, s dostatnom sposobnošću provođenja struje, spojeni s dotičnim uzemljivačkim sustavom. To posebno vrijedi za zaštitnu užad nadzemnih vodova, užad položenu u zemlju i kabele s uzemljivačkim učinkom. To vrijedi i za uzemljivačke sustave koji su s dotičnim uzemljivačkim sustavom spojeni preko plašteva ili zaslona kabela, PEN vodiča ili na drugi način.

Za dokazivanje proračunom mogu se, s pomoću slike K–3, uzeti u obzir svi kabeli s uzemljivačkim učinkom, osim ako su kabeli položeni u više od 4 trase. Ti kabeli mogu pripadati sustavima različitih napona.

Napomena: Ako su kabeli položeni u više od 4 trase, ne smije se zanemariti njihov međusobni utjecaj. U tome slučaju valja među postojećim trasama izabrati samo 4 trase. Ako je više kabela položeno u jednoj trasi, računa se s duljinom samo jednoga kabela.

Za određivanje potencijala i napona dodira mjerodavne su struje iz tablice P9–1.

Pri dimenzioniranju uzemljivačkih sustava treba uzeti u obzir dva slučaja: sustave s rezonantno uzemljenom neutralnom točkom i sustave s neuzemljenom neutralnom točkom. Ako se primjenjuje kratkotrajno uzemljenje neutralne točke preko male impedancije, uzemljivački sustav mora se dimenzionirati na osnovi vremena sklopa zemljospoja manjeg od 5 s, a inače se uzemljivački sustav mora dimenzionirati na osnovi vremena zemljospoja većeg od 5 s (vidjeti tablicu D–1).

P9.9.3 Izvedba uzemljivačkih sustava

9.3.1 Izvođenje uzemljivača i zemljovoda

Uzemljivački sustav općenito se satoji od nekoliko vodoravnih, okomitih ili kosih uzemljivača koji su položeni u zemlju ili zabijeni u zemlju.

Ne preporučuje se primjena kemikalija radi smanjivanja specifičnog otpora tla.

Vodoravni uzemljivači obično se moraju položiti na dubini 0,5 m do 1 m. Time se postiže dostatna mehanička zaštita. Preporučuje se da uzemljivač bude na dubini većoj od dubine zamrzavanja.

U slučaju okomito zabijenih štapova vrh svakog štapa obično je ispod površine zemlje. Okomito i koso zabijeni štapovi posebno su povoljni kad specifični otpor tla opada s dubinom.

Metalni okviri uzemljeni prema ovoj normi, koji predstavljaju konstrukcijsku jedinicu, mogu se primijeniti kao vodič za uzemljenje za dijelove koji su izravno pričvršćeni na taj okvir. U vezi s tim cijeli okvir mora biti dostatno vodljivog presjeka, a spojevi moraju biti pouzdani s obzirom na vodljivost i čvrstoću. Moraju se poduzeti mjere kako bi se izbjeglo da se pri privremenom rastavljanju dio okvira odvoji od uzemljivačkog sustava. Veliki okviri moraju se s uzemljivačkim sustavom spojiti na dostatnome broju mjesta.

Opće potankosti o izvođenju dane su u dodatku L.

Tablica P9–1. Struje mjerodavne za projektiranje uzemljivačkih sustava.

Vrsta visokonaponskog sustava		Mjerodavno za toplinsko opterećenje[1)]		Mjerodavno za potencijal i napone dodira
		Uzemljivač	Zemljovod	
Sustavi s neuzemljenom neutralnom točkom		– [6)]	I''_{kEE} [9)]	$I_E = r \times I_C$ [7)]
Sustavi s rezonantno uzemljenom neutralnom točkom	Stanice s kompenzacijskim prigušnicama	– [6)]	I''_{kEE} [3) 9)]	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ [2)]
	Stanice bez kompenzacijskih prigušnica			$I_E = r \times I_{Res}$
Sustavi s neutralnom točkom uzemljenom preko male impedancije [otpora]		I''_{k1} [4)]	I''_{k1}	I_E [5)]

1) Moraju se poštovati najmanji presjeci prema dodatku A.
2) Samo za dobro kompenzirane sustave. Kod znatnog odstupanja od rezonancije mora se dodatno uzeti u obzir jalova komponenta preostale struje.
3) Nazivne struje kompenzacijskih prigušnica moraju se uzeti u obzir i pri dimenzioniranju vodiča za uzemljenje kompenzacijskih prigušnica.
4) Ako je moguće više strujnih staza, za projektiranje uzemljivačkog sustava može se uzeti u obzir proistekla razdioba struje.
5) Nema opće formule (npr. vidjeti sliku P9–2)
6) Dostatni su najmanji presjeci prema dodatku A.
7) Ako postoji vjerojatnost da u mjesnim visokonaponskim sustavima, npr. industrijskim postrojenjima, zemljospoj traje znatno vrijeme, npr. više sati, u obzir se mora uzeti I''_{kEE}.
8) Ako je I''_{kEE} veći od I''_{k1}, mora se računati s tom vrijednošću.
9) Ako je vrijeme isklopa kratkog spoja kraće od 1 s, može se primijeniti I_C ili I_{Res}.

Tumač znakova za tablicu P9–1

I_C izračunana ili izmjerena kapacitivna struja zemljospoja.

I_{Res} preostala struja zemljospoja (vidjeti sliku P9–3b); ako se ne raspolaže tom vrijednošću, može se pretpostaviti 10 % od I_C.

I''_{kEE} struja dvostrukog zemljospoja izračunana prema HD 533 (za I''_{kEE} može se kao najveća vrijednost primijeniti 85 % od početne simetrične struje kratkog spoja).

I''_{k1} početna simetrična struja jednopolnoga kratkog spoja izračunana prema HD 533.

I_E struja prema zemlji (vidjeti sliku P9–2)

r redukcijski faktor (vidjeti dodatak J).
Ako nadzemni vodovi i kabeli koji izlaze iz stanice imaju različite redukcijske faktore, mora se odrediti mjerodavna struja (prema dodatku N).

9.3.3 Preneseni potencijali

Pravila za telekomunikacijske sustave u visokonaponskim uzemljivačkim sustavima ili u njihovoj blizini izvan su područja primjene ove norme. Postojeći međunarodni dokumenti (npr. smjernice ITU-a) moraju se uzeti u obzir kod razmatranja prenesenih potencijala izazvanih telekomunikacijskim sustavima.

Kabeli i izolirane metalne cijevi koje ulaze u stanicu ili iz nje izlaze mogu za vrijeme zemljospoja u stanici biti izloženi naponskim razlikama.

Ovisno o načinu uzemljenja, zaslonu i/ili armaturi kabela (uzemljenje na jednome ili na oba kraja), mogu se u zaslonu i/ili armaturi pojaviti znatni potencijali ili struje. Izolacija kabela ili cijevi mora se dimenzionirati u skladu s tim.

U slučaju uzemljenja na jednome kraju to se uzemljenje može provesti u stanici ili izvan nje. Pozornost se mora posvetiti dodirnim naponima na neuzemljenome kraju.

Kad je potrebno, mogu se poduzeti sljedeće mjere:

- prekid neprekinutosti metalnih dijelova na mjestu gdje oni izlaze iz područja uzemljivačkog sustava
- izoliranje vodljivih dijelova ili područja
- izvođenje prikladnih pregrada oko vodljivih dijelova ili područja radi sprečavanja njihova dodirivanja
- izvođenje izolacijskih pregrada između dijelova spojenih s različitim uzemljivačkim sustavima
- prikladno oblikovanje potencijala
- ograničenje prenapona pomoću prikladnih naprava.

Kad je visokonaponski uzemljivački sustav dio ukupnoga uzemljivačkog sustava u kojem se normalno ne smiju pojaviti opasne razlike potencijala, problemi se mogu pojaviti ako se istodobno dohvatljivi vodljivi dijelovi izoliranih cijevi, kabela itd. spojenih s potencijalom daleke zemlje i uzemljeni vodljivi dijelovi visokonaponskog postrojenja.

Zato je potrebno tu opremu postaviti na dostatnoj udaljenosti od područja koja su pod utjecajem uzemljivača. Ako to nije moguće, moraju se poduzeti prikladne mjere.

Kako nije moguće propisati opći razmak, stupanj opasnosti mora se odrediti za svaki pojedini slučaj. Neke upute za proračun dane su u dodatku M.

9.3.4 Mjere uzemljenja opreme i postrojenja

Svi dostupni vodljivi dijelovi koji su dio električnog sustava moraju se uzemljiti. U posebnim slučajevima moraju se stvoriti izolirana područja.
Strani vodljivi dijelovi moraju se uzemljiti ako je to prikladno, npr. s obzirom na luk, kapacitivnu i induktivnu spregu.
Potanke mjere uzemljenja ograda, cijevi, željezničkih tračnica itd. dane su u dodatku F.

P9.9.4 Zajednički uzemljivački sustav za visokonaponski i niskonaponski sustav [združeno uzemljenje]

9.4.1 Uvjeti za zajednički uzemljivački sustav

Niskonaponski neutralni vodič ili PEN vodič može se spojiti s visokonaponskim uzemljivačkim sustavom, čime se dobiva zajednički uzemljivački sustav, ako su za vrijeme zemljospoja u visokonaponskom postrojenju ispunjeni sljedeći uvjeti:

- u niskonaponskoj mreži ili u priključenim potrošačkim postrojenjima ne pojavljuju se opasni naponi dodira (vidjeti sliku P9–4). (To će se postići ako

potencijal zajedničkog uzemljivačkog sustava ne prelazi vrijednost iz tablice P9–2.)

- veličina potencijala (industrijske frekvencije) niskonaponske opreme u potrošačkim postrojenjima ne prelazi vrijednosti koje su moguće uslijed potencijala niskonaponske neutralne točke iz tablice P9–2.

Tablica P9–2. Zahtjevi na zajedničke uzemljivačke sustave kod napajanja niskonaponskih postrojenja izvan područja visokonaponskoga uzemljivačkog sustava.

Vrsta visokonaponskog sustava [1]	Trajanje kvara	Zahtjevi za zajednički uzemljivački sustav s obzirom na [2] [3]	
		napon dodira	potencijal
TT [4]	$t_F \leq 5$ s	nema zahtjeva	$U_E \leq 1200$ V
	$t_F > 5$ s		$U_E \leq 250$ V
TN [5]		$U_E \leq U_{Tp}$ [6]	nema zahtjeva
		$U_E \leq X \times U_{Tp}$ [7]	

Uobičajena vrijednost za X je 2. Iskustvo pokazuje da u posebnim slučajevima mogu za X biti prihvatljive vrijednosti do 5.

1) Definicije vrsta niskonaponskih sustava vidjeti u HD 384.3. Sustavi IT s niskonaponskim zaštitnim vodičem spojenim s visokonaponskim uzemljivačkim sustavom razmatrani su u podtočki 9.4.2 jer se oni normalno primjenjuju za industrijska postrojenja. Drugi sustavi IT nisu razmatrani.
2) U_E je potencijal zajedničkog uzemljivačkog sustava. Način njegova proračuna opisan je u dodatku N, HD 637 S1:1999.
3) Potrebno je uzeti u obzir da će na potencijal transformatorske stanice utjecati preneseni potencijali, npr. potencijali plašteva kabela spojenih sa susjednim postrojenjima.
4) Mora se uzeti u obzir podnošljivi napon niskonaponske opreme (na osnovi HD 384.4.442).
5) Mora se uzeti u obzir napon dodira (sigurnost ljudi).
6) Spajanje PEN vodiča niskonaponskog sustava i visokonaponskoga uzemljivačkog sustava učinjeno je samo u transformatorskoj stanici.
7) PEN vodič niskonaponskog sustava uzemljen je na više mjesta radi ograničavanja potencijala PEN vodiča.

9.4.2 Napajanje niskonaponskih postrojenja u području visokonaponskoga uzemljivačkog sustava

Ako visokonaponsko postrojenje napaja niskonaponske potrošače koji se nalaze u području visokonaponskog uzemljivačkog sustava, sva zaštitna uzemljenja i uzemljenja sustava mogu se spojiti sa zajedničkim uzemljivačkim sustavom. Tada se može smatrati da su za te niskonaponske potrošače ispunjeni uvjeti iz podtočke 9.4.1.

9.4.3 Napajanje niskonaponskih postrojenja izvan područja visokonaponskoga uzemljivačkog sustava

Može se smatrati da su uvjeti iz podtočke 9.4.1 ispunjeni:

- ako je uzemljivački sustav visokonaponskoga postrojenja spojen s ukupnim uzemljivačkim sustavom

ili

- ako su, ovisno o postupanju sa zaštitnim vodičem za uzemljenje niskonaponskog sustava i o trajanju kvara, ispunjeni uvjeti iz tablice P9–2.

Ako je dopušten, preporučuje se zajednički uzemljivački sustav.

9.4.4 Odvojeni uzemljivački sustavi

Visokonaponski i niskonaponski uzemljivački sustav moraju se odvojiti ako nije ispunjen ni jedan od uvjeta iz podtočke 9.4.3. Mora se izabrati takvo odvajanje uzemljivača da u niskonaponskome postrojenju ne bude opasnosti za ljude ili opremu, tj. da potencijal koji visokonaponski zemljospoj izaziva na niskonaponskom uzemljivačkom sustavu bude manji od vrijednosti iz tablice P9–2. Za postrojenja pripisanog napona ispod 50 kV sigurna je vrijednost najmanjeg razmaka uzemljivača 20 m. Potrebni razmak d_{accept} može se izračunati i s pomoću formule uz uzimanje u obzir geometrijskog oblika uzemljivača (vidjeti primjere u dodatku M).

U području oko visokonaponskoga postrojenja s $d < d_{accept}$ nije dopušteno uzemljenje visokonaponskog sustava. Ako je potrebno, moraju se primijeniti posebne mjere.

Odvojeni uzemljivački sustavi mogu se u stanici spojiti preko odvodnika prenapona radi postizanja zaštite od udara groma

Napomena: Napon gašenja odvodnika odnosno trajni pogonski napon (metal--oksidni odvodnici) mora biti veći od potencijala visokonaponskoga uzemljivačkog sustava.

Radi zaštite od neizravnog dodira dostupni vodljivi dijelovi niskonaponske opreme koja se nalazi u stanici moraju se s visokonaponskim uzemljivačkim sustavom spojiti s pomoću zaštitnih vodiča.

Ako je visokonaponski i niskonaponski uzemljivački sustav odvojen, pri dimenzioniranju izolacije niskonaponske opreme u stanici mora se uzeti u obzir veličina i trajanje potencijala uzemljenja.

P9.9.5 Mjere uzemljenja za zaštitu od učinaka groma

Visokonaponski uzemljivački sustav mora se primijeniti za zaštitu od groma. Znatan otpor i induktivitet u odvodnoj stazi prema zemlji smanjuju učinkovitost svih naprava za zaštitu od prenapona. Zato veza s uzemljivačem mora biti što kraća i pravocrtnija.

P9.9.7 Pregled uzemljivačkih sustava na lokaciji i dokumentacija uzemljivačkih sustava

Mora postojati nacrt situacije uzemljivačkog sustava.

Za vrijeme izvođenja mora se pregledom provjeriti ispravna primjena mjera zaštite od korozije, posebno na spojevima.

Dodatne potankosti o pregledu uzemljivačkih sustava na lokaciji i o dokumentaciji uzemljivačkih sustava dane su u dodatku P Norme HD 637 S1:1999.

P9.9.8 Opće napomene o provjeri uzemljivačkih sustava i nadzoru nad njima

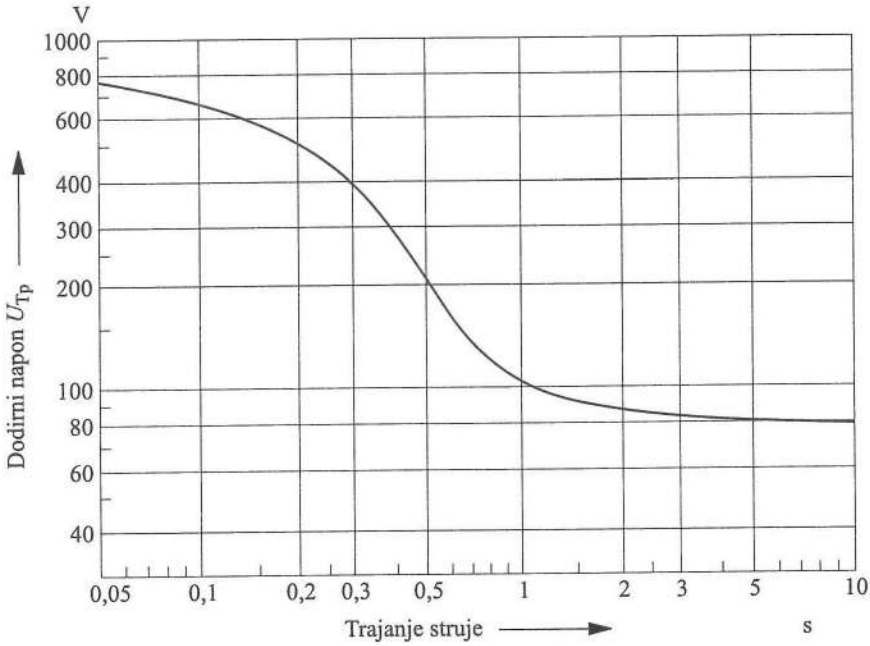
9.8.1 Provjera pregledom

Stanje dijelova uzemljivačkih sustava mora se periodično provjeriti pregledom (npr. svakih 5 godina).

Napomena: Općenito je dobra praksa iskopati na više mjesta (npr. mjesta spojeva, mjesta ulaza u zemlju).

9.8.2 Provjera mjerenjima ili proračunima

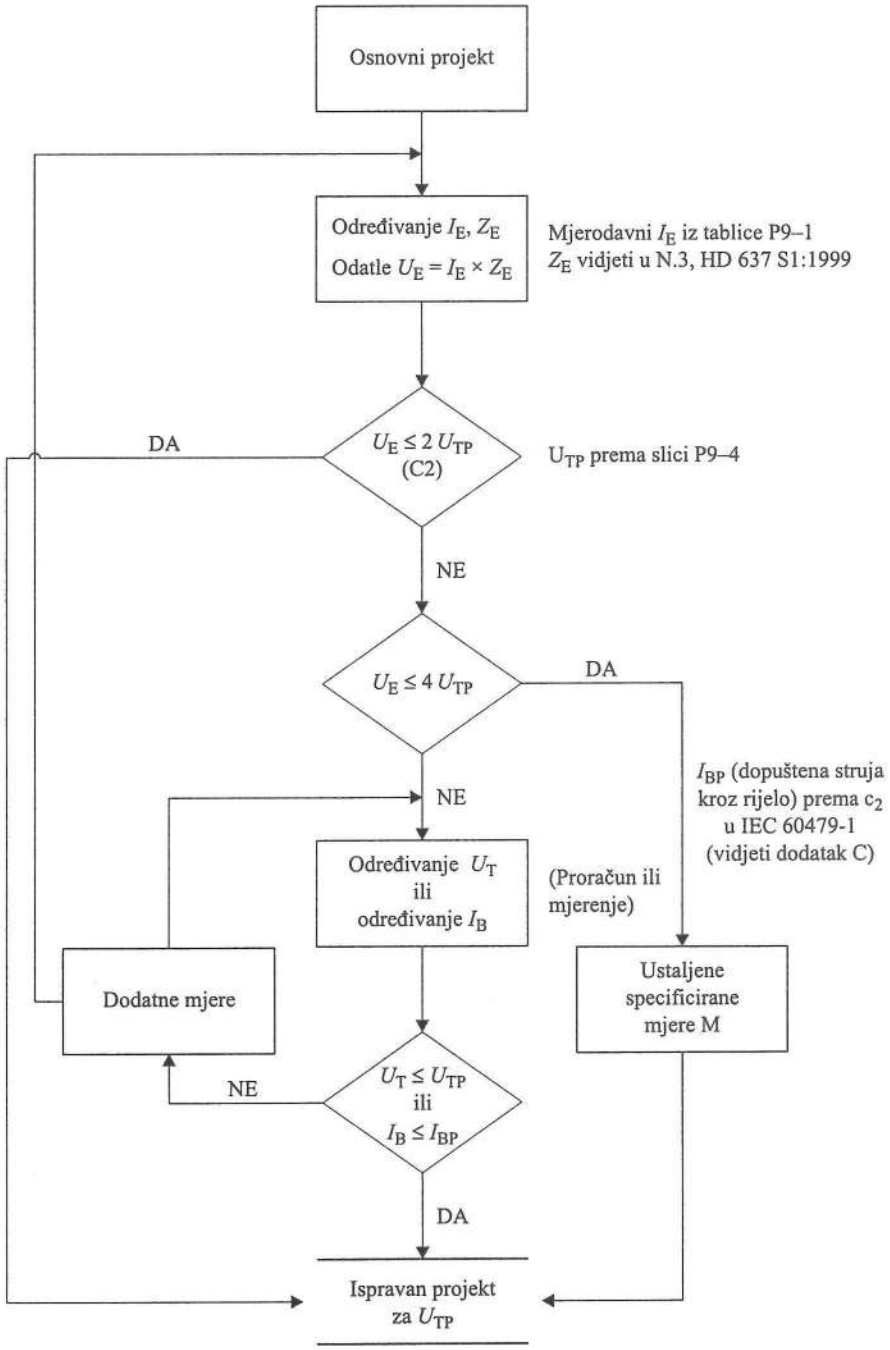
Mjerenja ili proračuni impedancije uzemljenja ili napona dodira mogu biti potrebni nakon većih promjena koje utječu na osnovne zahtjeve (vidjeti podtočku 9.2).



Napomena 1: Krivulja se odnosi na zemljospojeve u visokonaponskim sustavima

Napomena 2: Ako je trajanje struje mnogo dulje od vremena obuhvaćenog dijagramom, može se za U_{Tp} primijeniti vrijednost 75 V.

Sl. P9–4. Dopušteni naponi dodira U_{Tp} u ovisnosti o trajanju struje.



Sl. P9–5. Projektiranje uzemljivačkih sustava s obzirom na dopušteni napon dodira U_{Tp} provjerom potencijala uzemljenja U_E ili napona dodira U_T kad uzemljivački sustavi nisu dio ukupnoga uzemljivačkoga sustava (C1)

Dodatak A (Normativni)

Gradiva i najmanje dimenzije uzemljivača kojima se jamči mehanička čvrstoća i otpornost na koroziju

Gradivo		Vrsta uzemljivača	Najmanja dimenzija				
			Osnovni materijal			Prevlaka	
			Promjer (mm)	Presjek (mm^2)	Debljina (mm)	Pojedinačne vrijednosti (μm)	Prosječne vrijednosti (μm)
Čelik	Vruće pocinčani	Traka[2)]		90	3	63	70
		Profil (uključivo ploče)		90	3	63	70
		Cijev	25		2	47	55
		Okrugle šipke za štapni uzemljivač	16			63	70
		Okrugla žica za vodoravni uzemljivač	10				50
	S olovnom prevlakom[1)]	Okrugla žica za vodoravni uzemljivač	8			1000	
	S ekstrudiranom bakrenom prevlakom	Okrugla šipka za štapni uzemljivač	15			2000	
	S elektrolitskom bakrenom prevlakom	Okrugla šipka za štapni uzemljivač	14,2			90	100
Bakar	Goli	Traka		50	2		
		Okrugla žica za vodoravni uzemljivač		25[3)]			
		Uže	1,8*	25			
		Cijev	20		2		
	Pokositreni	Uže	1,8*	25		1	5
	Pocinčani	Traka		50	2	20	40
	S olovnom prevlakom[1)]	Uže	1,8*	25		1000	
		Okrugla žica		25		1000	

* Za pojedinu žicu užeta.

1) Nije prikladno za izravno polaganje u beton.

2) Traka, valjana ili rezana sa zaobljenim rubovima.

3) U iznimnim slučajevima kad iskustvo pokazuje da je opasnost od korozije i mehaničkog oštećenja velika. Iznimno se može primijeniti 16 mm^2.

Dodatak C (Normativni)

Napon dodira i struja kroz tijelo

C.1 Istovrijednost napona dodira i struje kroz tijelo

Za proračun dopuštenih vrijednosti napona dodira u visokonaponskim postrojenjima načinjene su sljedeće pretpostavke:

- strujna staza od jedne ruke do nogu
- 50 %-tna vjerojatnost impedancije tijela
- 5 %-tna vrijednost ventrikularne fibrilacije
- nema dodatnih otpora.

Napomena: Te pretpostavke dovode do krivulje napona dodira čiji je procijenjeni rizik, uz uzimanje u obzir iskustva, posebno uvježbanog osoblja, opravdanih troškova itd., prihvatljiv za zemljospojeve u visokonaponskim postrojenjima.

Pretpostavljajući da je osnovica za proračun struje kroz tijelo norma IEC/TR2 60479-1, a uz uzimanje u obzir dopuštene granice struje prema krivulji c_2 na slici 14 iz IEC/TR2 60479-1:1994 (vjerojatnost ventrikularne fibrilacije manja od 5 %, strujna staza od lijeve ruke do obiju nogu), dobiva se tablica C–1.

Tablica C–1. Dopuštena struja kroz tijelo I_B u ovisnosti o trajanju kvara t_F.

Trajanje kvara (s)	Struja kroz tijelo (mA)
0,05	900
0,1	750
0,2	600
0,5	200
1	80
2	60
5	51
10	50

Da bi se dobio mjerodavni dopušteni napon dodira, potrebno je odrediti ukupnu impedanciju ljudskoga tijela. Ta impedancija ovisi o naponima dodira i strujnoj stazi. U IEC/TR 60479-1 navedene su vrijednosti za strujnu stazu od ruke do ruke ili od ruke do noge na osnovi kojih je dobivena tablica C–2 (50 %-tna vjerojatnost da su impedancije tijela jednake danim vrijednostima ili manje od njih).

Uzimajući u obzir strujnu stazu od ruke do nogu mora se za impedanciju tijela primijeniti faktor ispravka 0,75 (slika 3 u IEC/TR2 60479-1:1994). Sastavljanjem tih dviju tablica, uz uzimanje u obzir tog faktora ispravka, moguće je postupkom ponavljanja izračunati granični napon dodira za svaku vrijednost trajanja kvara. Rezultat je prikazan na slici P9–4. U tablici C–3 navedene su neke vrijednosti krivulje sa slike P9–4.

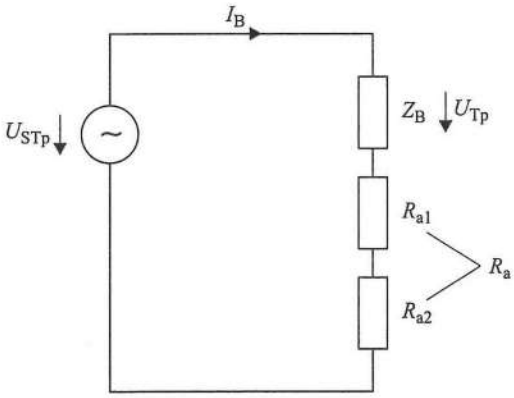
Tablica C–2. Ukupna impedancija ljudskoga tijela Z_B u ovisnosti o naponu dodira U_T za strujnu stazu od ruke do ruke ili od ruke do noge.

Napon dodira (V)	Ukupna impedancija ljudskoga tijela (Ω)
25	3250
50	2625
75	2200
100	1875
125	1625
220	1350
700	1100
1000	1050

Tablica C–3. Izračunane vrijednosti dopuštenoga napona dodira U_{Tp} u ovisnosti o trajanju kvara t_F.

Trajanje kvara t_F (s)	Dopušteni napon dodira U_{Tp} (V)
10	80
1,1	100
0,72	125
0,64	150
0,49	220
0,39	300
0,29	400
0,20	500
0,14	600
0,08	700
0,04	800

C.2 Uzimanje u obzir dodatnih otpora



Sl. C–1. Shema dodirnog kruga

Tumač znakova za cliku C–1, tablicu C–3 i tablicu C–4:

U_{STp} razlika napona, koja predstavlja napon napajanja u dodirnome krugu, čija je vrijednost ograničena tako da je zajamčena sigurnost osoblja kod primjene poznatih dodatnih otpora (npr. obuća, stajalište od izolacijskog gradiva); kad se ne uzimaju u obzir dodatni otpori, U_{STp} jednak je U_{Tp} sa slike P9–4

Z_B impedancija tijela

I_B struja kroz tijelo

U_{Tp} dopušteni napon dodira, napon na ljudskome tijelu

R_a dodatni otpor ($R_a = R_{a1} + R_{a2}$)

R_{a1} npr. otpor obuće

R_{a2} otpor uzemljenja stajališta

ρ_S specifični otpor tla blizu površine u postrojenju (Ωm)

t_F trajanje kvara

Tablica C–4. Pretpostavke za proračune s dodatnim otporima.

Vrsta dodira	Od lijeve ruke do obiju noga
Vjerojatnost vrijednosti Z_B	50 %
Krivulja $I_B = f(t_F)$	c_2 na slici 14 u IEC/TR2 60479-1:1994
Impedancija kruga	Z_B (50 %) + R_a
Dodatni otpor	$R_a = R_{a1} + R_{a2} = R_{a1} + 1{,}5\ \mathrm{m}^{-1} \times \rho_S$

Način proračuna:

t_F (trajanje kvara)

⇩

$U_{Tp} = f(t_F)$ prema C–1 (odnosno slici P9–4)

⇩

$Z_B = f(U_{Tp})$ prema C–1, tablici C–2 (odnosno IEC/TR2 60479-1:1994, slika 4. i slika 5.)

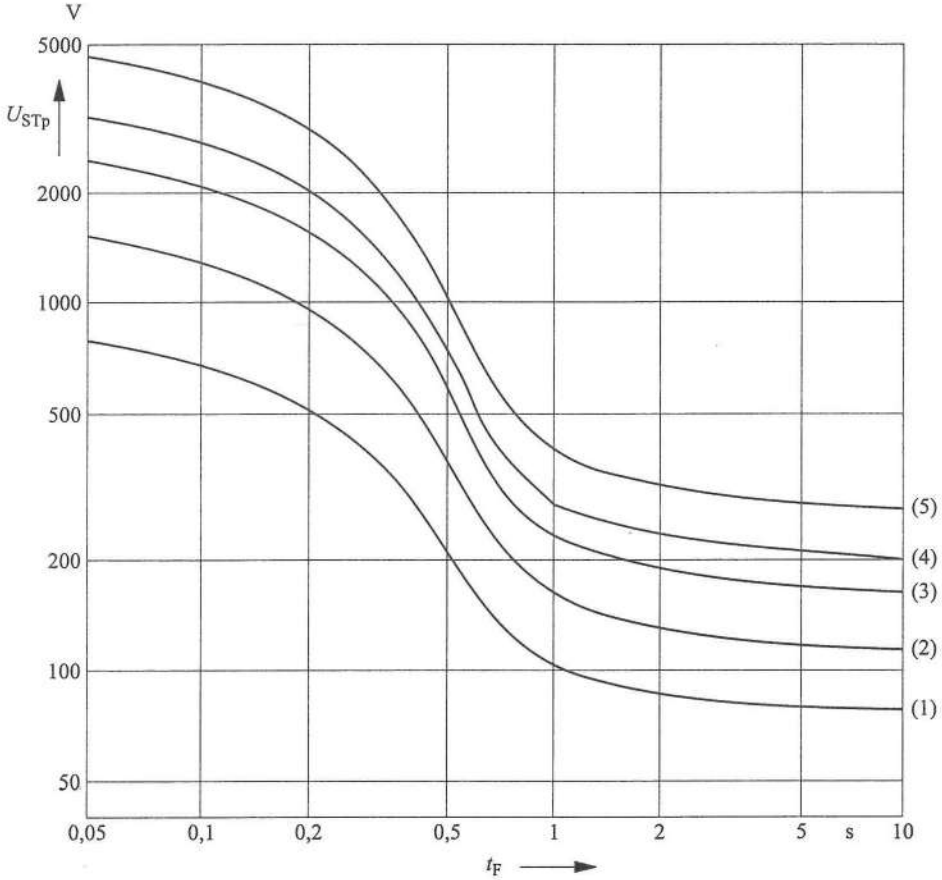
$I_B = \dfrac{U_{Tp}}{Z_B}$ po definiciji

⇩

$$U_{STp}(t_F) = U_{Tp}(t_F) + (R_{a1} + R_{a2}) \times I_B$$

$$= U_{Tp}(t_F) \cdot \left(1 + \frac{R_a}{Z_B}\right)$$

Slika C–2 prikazuje krivulje $U_{STp} = f(t_F)$ za 4 vrijednosti R_a.



(1) bez dodatnih otpora (prema slici P9–3
(2) R_a = 750 Ω (R_{a1} = 0 Ω, ρ_S = 500 Ωm)
(3) R_a = 1750 Ω (R_{a1} = 1000 Ω, ρ_S = 500 Ωm)
(4) R_a = 2500 Ω (R_{a1} = 1000 Ω, ρ_S = 1000 Ωm)
(5) R_a = 4000 Ω (R_{a1} = 1000 Ω, ρ_S = 2000 Ωm)

Napomena: R_{a1} = 1000 Ω prosječna je vrijednost za stare i mokre cipele

Sl. C–2. Primjeri krivulja $U_{STp} = f(t_F)$ za različite dodatne otpore $R_a = R_{a1} + R_{a2}$.

Dodatak D (Normativni)

Opis priznatih propisanih mjera M

Tablica D–1. Uvjeti primjene priznatih propisanih mjera M za jamčenje dopuštenih dodira napona U_{Tp} (vidjeti sliku P9–4).

Trajanje kvara t_F	Potencijal uzemljenja U_E	Na vanjskim zidovima i ogradama oko postrojenja	U postrojenju	
			Unutarnje postrojenje	Vanjsko postrojenje
$t_F > 5$ s	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M1 ili M2	M3	M4.1 ili M4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Dokaz $U_T \leq U_{Tp}$	M3	M4.2
$t_F \leq 5$ s	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	M1 ili M2	M3	M4.2
	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	Dokaz $U_T \leq U_{Tp}$		

M1 **Priznate propisane mjere za vanjske zidove zgrada s unutarnjim postrojenjima**

Kao zaštita od vanjskoga napona dodira može se primijeniti jedna od priznatih propisanih mjera M1.1 – M1.3.

M1.1 Primjena nevodljivoga gradiva za vanjske zidove (npr. kamen, cigla ili drvo) i izbjegavanje uzemljenih metalnih dijelova koji se mogu dodirnuti izvana.

M1.2 Oblikovanje potencijala vodoravnim uzemljivačem koji je spojen s uzemljivačkim sustavom i koji je položen s vanjske strane vanjskog zida na udaljenosti od oko 1 m od tog zida i na dubini od najviše 0,5 m.

M1.3 Izoliranje mjesta posluživanja: slojevi izolacijskoga gradiva moraju biti toliko veliki da je onemogućeno s mjesta izvan izolacijskog sloja rukom dodirnuti uzemljene vodljive dijelove.

Ako je dodirivanje moguće samo u bočnome smjeru, dostatan je izolacijski sloj širine 1,25 m.

Smatra se da je izoliranje mjesta posluživanja dostatno u sljedećim slučajevima:
- sloj lomljenoga kamena debljine od najmanje 100 mm
- sloj asfalta s odgovarajućom podlogom (npr. šljunak)
- izolacijski tepih površine najmanje 1000 mm × 1000 mm i debljine najmanje 2,5 mm ili mjera koja jamči istovrijedno izoliranje.

M2 **Priznate propisane mjere za vanjske ograde vanjskih postrojenja**

Kao zaštita od vanjskoga napona dodira može se primijeniti jedna od priznatih propisanih mjera M2.1 – M2.3; na vratima vanjskih ograda mora se primijeniti i priznata propisana mjera M2.4.

M2.1 Primjena ograda od nevodljivoga gradiva ili plastificirane žičane mreže (čak i kod golih vodljivih stupova).

M2.2 Kod primjene ograda od vodljivoga gradiva, oblikovanje potencijala vodoravnim uzemljivačem koji je spojen s ogradom i koji je položen s vanjske strane

ograde na udaljenosti od oko 1 m od ograde i na dubini od najviše 0,5 m. Po izboru ograda se može spojiti ili ne spojiti s uzemljivačkim sustavom (međutim, vidjeti priznatu propisanu mjeru M2.4).

M2.3 Izoliranje mjesta posluživanja prema priznatoj propisanoj mjeri M1.3 i uzemljenje ograde prema dodatku F ili spajanjem s uzemljivačkim sustavom.

M2.4 Ako su vrata vanjskih ograda spojena s uzemljivačkim sustavom izravno ili preko zaštitnih vodiča ili metalnih plašteva kabela sustava za pozivanje osoblja itd., mora se u području otvaranja vrata primijeniti oblikovanje potencijala ili izoliranje mjesta posluživanja prema priznatoj propisanoj mjeri M1.3.

Kad se vrata u zasebno uzemljenoj vodljivoj ogradi moraju spojiti s glavnim uzemljivačkim sustavom, vrata se moraju od vodljivih dijelova ograde odvojiti tako da se postigne električno odvajanje od najmanje 2,5 m. To se može postići tako da se dio ograde izvede od nevodljivog gradiva ili tako da se u vodljivu ogradu umetnu umeci. Valja paziti da se električno odvajanje održi i kad su vrata potpuno otvorena.

M3 **Priznate propisane mjere u unutarnjim postrojenjima**

U unutarnjim postrojenjima može se primijeniti jedna od priznatih propisanih mjera M3.1 – M3.3.

M3.1 Oblikovanje potencijala polaganjem mrežastih uzemljivača u temelje zgrade (npr. s presjekom od najmanje 50 mm^2 i s okom mreže do 10 m ili armaturnih mreža) i spajanje s uzemljivačkim sustavom na najmanje dva zasebna mjesta.

Ako se i armatura betona primjenjuje za odvođenje struje kvara, mora se proračunom provjeriti može li armatura podnijeti odgovarajuću struju.

Ako se primjenjuju armaturne mreže, susjedne se mreže moraju spojiti najmanje jedanput, a sve mreže zajedno moraju se na najmanje dva mjesta spojiti s uzemljivačkim sustavom.

Kod postojećih zgrada može se primijeniti vodoravni uzemljivač koji se mora položiti u zemlju blizu vanjskih zidova i koji se mora spojiti s uzemljivačkim sustavom.

M3.2 Izvedba metalnih mjesta posluživanja (npr. metalna mreža ili metalna ploča) i njihovo spajanje sa svim metalnim dijelovima koje treba uzemljiti i koje je moguće dodirnuti s mjesta posluživanja.

M3.3 Izoliranje mjesta posluživanja za potencijal uzemljivačkog sustava prema priznatoj propisanoj mjeri M1.3. Radi izjednačavanja potencijala valja povezati metalne dijelove koji se moraju uzemljiti i koje je moguće istodobno dodirnuti s mjesta posluživanja.

M4 **Priznate propisane mjere u vanjskim postrojenjima**

M4.1 Na mjestima posluživanja:

Oblikovanje potencijala vodoravnim uzemljivačem koji je položen na udaljenosti od oko 1 m od opreme koju treba posluživati i na dubini od oko 0,2 m. Taj

vodoravni uzemljivač mora se spojiti sa svim metalnim dijelovima koji se moraju uzemljiti i koje je moguće dodirnuti s mjesta posluživanja.

ili

Izvedba metalnih mjesta posluživanja (npr. metalna mreža ili metalna ploča) i njihovo spajanje sa svim metalnim dijelovima koje treba uzemljiti i koje je moguće dodirnuti s mjesta posluživanja.

ili

Izoliranje mjesta posluživanja prema priznatoj propisanoj mjeri M1.3. Radi izjednačenja potencijala valja povezati metalne dijelove koji se moraju uzemljiti i koje je moguće dodirnuti s mjesta posluživanja.

M4.2 Polaganje vodoravnog uzemljivača u obliku zatvorenoga prstena oko uzemljivačkog sustava. Unutar toga prstena mora se položiti uzemljivačka mreža s okom do 10 m × 50 m. Na pojedinim dijelovima postrojenja koji se nalaze izvan prstena i koji su spojeni s uzemljivačkim sustavom mora se izvesti uzemljivač za oblikovanje potencijala na udaljenosti od oko 1 m i na dubini od oko 0,2 m (npr. rasvjetni stupovi koji su s uzemljivačkim sustavom spojeni preko zaštitnih vodiča).

Dodatak F (Normativni)

Posebne mjere za uzemljenje opreme i postrojenja

F.1 Ograde oko postrojenja stanice

Gole metalne ograde moraju se uzemljiti i to na više mjesta, npr. u svakom uglu. Ovisno o lokalnim prilikama (ograda u uzemljivačkom sustavu ili izvan njega) ograda se mora uzemljiti tako da se spoji na uzemljivački sustav ili zasebne uzemljivače.

Nije potrebno uzemljiti gole metalne dijelove ograde koji su prevučeni izolacijskim gradivom.

Svi fizički prekidi u ogradi oko postrojenja stanice, npr. vrata, moraju se povezati tako da se među dijelovima ograde ne mogu pojaviti opasni potencijali.

F.2 Cijevi

Metalne cijevi unutar stanice moraju se spojiti s uzemljivačkim sustavom stanice.

Mora se izbjegavati primjena metalnih cijevi, npr. za opskrbu vodom izvana, te se moraju promijeniti nemetalna gradiva.

F.3 Željezničke tračnice

Tračnice neelektrificiranih kolosijeka koji ulaze u stanicu moraju se spojiti s uzemljivačkim sustavom stanice.

Na obodu stanice moraju se primijeniti prikladni izolacijski spojevi tračnica kojima će se održati električno odvajanje prema vanjskim kolosijecima. U nekim slučajevima mogu biti potrebna dva izolacijska spoja tračnica kako bi se spriječilo da lokomotiva ili vagon premosti mjesto odvajanja. Posebna pozornost mora se posvetiti mjestima posluživanja na kolosijeku. Pri određivanju potrebnih mjera valja se savjetovati sa željeznicom i u obzir se moraju uzeti odredbe podtočke 9.3.3.

F.4 Transformatori i/ili sklopna postrojenja na stupu

Općenito se mora uzemljiti sva na stupu postavljena transformatorska oprema, bilo da je sama ili u kombinaciji sa sklopnom opremom.

U slučajevima kad je na stupu samo transformator, najmanji uzemljivački sustav (npr. štapni uzemljivač ili prstenasti uzemljivač ili temelj vodljivog stupa) ispunjava zahtjeve za uzemljenje transformatora.

Općenito se mora uzemljiti sklopna oprema postavljena na stupove od čelika ili drugoga vodljivoga gradiva ili od armiranog betona. Uzemljivački sustav treba izvesti najmanje kao izjednačenje potencijala pomoću uzemljivačke mreže na mjestu posluživanja. Inače, kad se upotrebljava izoliranje mjesta posluživanja ili kad se sklapanje obavlja s pomoću izolacijske opreme (npr. izolacijski alati, tepisi ili rukavice), dostatan je najmanji uzemljivački sustav (npr. štapni uzemljivač ili prstenasti uzemljivač).

Sklopna oprema postavljena na stupove od nevodljivoga gradiva ne mora se uzemljiti. Ako ta oprema nije uzemljena, moraju se u polužne pogone izvan normalnog dohvata ruke ugraditi pouzdani izolatori (npr. puni izolatori). Ti izolatori moraju biti dimenzionirani za nazivni napon sustava. Dio pogona koji se može dodirnuti sa zemlje mora se uzemljiti radi odvođenja mogućih odvodnih struja. Za to je dostatan štapni uzemljivač duljine najmanje 1 m ili prstenasti uzemljivač oko stupa na udaljenosti od oko 1 m. Najmanji presjeci uzemljivača i vodiča za uzemljenje moraju biti prema dodatku A i prema podtočkama 9.2.2 i 9.2.3.

F.5 **Sekundarni krugovi mjernih transformatora**

Sekundarni krugovi svih mjernih transformatora moraju se uzemljiti što je moguće bliže sekundarnim stezaljkama mjernih transformatora.

Za te vodiče za uzemljenje ne vrijede najmanji presjeci prema podtočki 9.2.2.2. Dostatan je presjek od najmanje 2,5 mm^2 bakra. Ako je zemljovod mehanički nezaštićen, potreban je presjek od najmanje 4 mm^2 bakra.

Međutim, ako je potrebno uzemljiti na nekim drugim mjestima, ne smije postojati mogućnost da se uzemljenje nepažnjom odvoji.

Dodatak J (Obavijesni)

Redukcijski faktori zaštitne užadi nadzemnih vodova i metalnih plašteva kabela

J.1 **Općenito**

Zaštitna užad nadzemnih vodova i metalni plaštevi kabela sudjeluju u provođenju struja kvara koje se vraćaju u zemlju. Oni dio struje zemljospoja dotičnoga kruga preuzimaju prema slici P9–2 u ovoj normi. Uslijed tog učinka uzemljivački sustav visokonaponskoga postrojenja u kojemu je zemljospoj učinkovito se rasterećuje struje zemljospoja. Opseg tog rasterećenja određen je redukcijskim faktorom.

Redukcijski faktor r zaštitnog užeta nadzemnog voda omjer je struje kroz zemlju i zbroja nultih struja trofaznoga strujnog kruga

$$r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{3I_0 - I_{EW}}{3I_0}$$

gdje su:

I_{EW} struja u zaštitnome užetu (u uravnotežnome stanju)
I_E struja kroz zemlju
$3I_0$ zbroj nultih struja.

Ista definicija vrijedi za redukcijski faktor kabela s metalnim plaštom, zaslonom, armaturom ili čeličnom cijevi oko kabela, samo što se umjesto struje u zaštitnom užetu I_{EW} radi o struji kroz metalni plašt itd.

Za uravnoteženu razdiobu struja nadzemnog voda redukcijski faktor zaštitnog užeta može se izračunati na osnovi vlastitih impedancija faznih vodiča $Z_{L\text{-}E}$ i zaštitnog užeta $Z_{EW\text{-}E}$ i međusobne impedancije između faznih vodiča i zaštitnog užeta $Z_{ML\text{-}EW}$:

$$r = \frac{Z_{EW\text{-}E} - Z_{ML\text{-}EW}}{Z_{EW\text{-}E}} = 1 - \frac{Z_{ML\text{-}EW}}{Z_{EW\text{-}E}}$$

$Z_{ML\text{-}EW}$ najviše ovisi o srednjemu razmaku između faznih vodiča i zaštitnog užeta a $Z_{EW\text{-}E}$ najviše ovisi o otporu zaštitnog užeta. S obzirom na to redukcijski učinak zaštitnog užeta to je veći (r je to manji) što je manji razmak između faznih vodiča i zaštitnog užeta i što je manji otpor zaštitnog užeta.

J.2 **Tipične vrijednosti redukcijskih faktora nadzemnih vodova i kabela (50 Hz)**

Zaštitna užad nadzemnih vodova (110 kV)

čelik 50...70 mm^2	$r = 0{,}98$
alučelik 44/32 mm^2	$r = 0{,}77$
alučelik 300/50 mm^2	$r = 0{,}61$

Kabeli s izolacijom od papira (10 i 20 kV)

Cu 95 mm^2 / olovni plašt 1,2 mm	$r = 0{,}20...0{,}60$
Al 95 mm^2 / aluminijski plašt 1,2 mm	$r = 0{,}20...0{,}30$

Jednožilni kabeli XLPE (10 i 20 kV)	
Cu 95 mm^2 / bakreni zaslon 16 mm^2	$r = 0{,}50 \ldots 0{,}60$
Jednožilni uljni kabeli (110 kV)	
Cu 300 mm^2 / aluminijski plašt 2,2 mm	$r = 0{,}37$
Kabeli pod tlakom plina u čeličnoj cijevi (110 kV)	
Cu 300 mm^2 / čelik 1,7 mm	$r = 0{,}01 \ldots 0{,}03$
Jednožilni kabeli XLPE (110 kV)	
Cu 300 mm^2 / bakreni zaslon 35 mm^2	$r = 0{,}32$
Jednožilni uljni kabeli (400 kV)	
Cu 1200 mm^2 / aluminijski plašt 1200 mm^2	$r = 0{,}01$

Dodatak K (Obavijesni)

Osnovica za projektiranje uzemljivačkih sustava

K.1 Specifični otpor tla

Specifični otpor tla ρ_E znatno se razlikuje ovisno o vrsti tla, veličini zrna, gustoći i vlažnosti (vidjeti tablicu K–1).

Tablica K–1. Specifični otpor tla za struje industrijske frekvencije (opseg često izmjerenih vrijednosti).

Vrsta tla	Specifični otpor tla ρ_E (Ωm)
Močvarno tlo	5 do 40
Ilovača, glina, humus	20 do 200
Pijesak	200 do 2 500
Šljunak	2000 do 3 000
Kamenito tlo	većinom ispod 1 000
Pješčenjak	2000 do 3 000
Granit	do 50 000
Naplavina šljunka	do 30 000

Do dubine od nekoliko metara promjene vlažnosti mogu izazvati privremene promjene specifičnog otpora tla. Osim toga, valja uzeti u obzir da se specifični otpor tla može znatno mijenjati s dubinom uslijed toga što obično postoje različiti slojevi tla.

K.2 Otpor uzemljenja

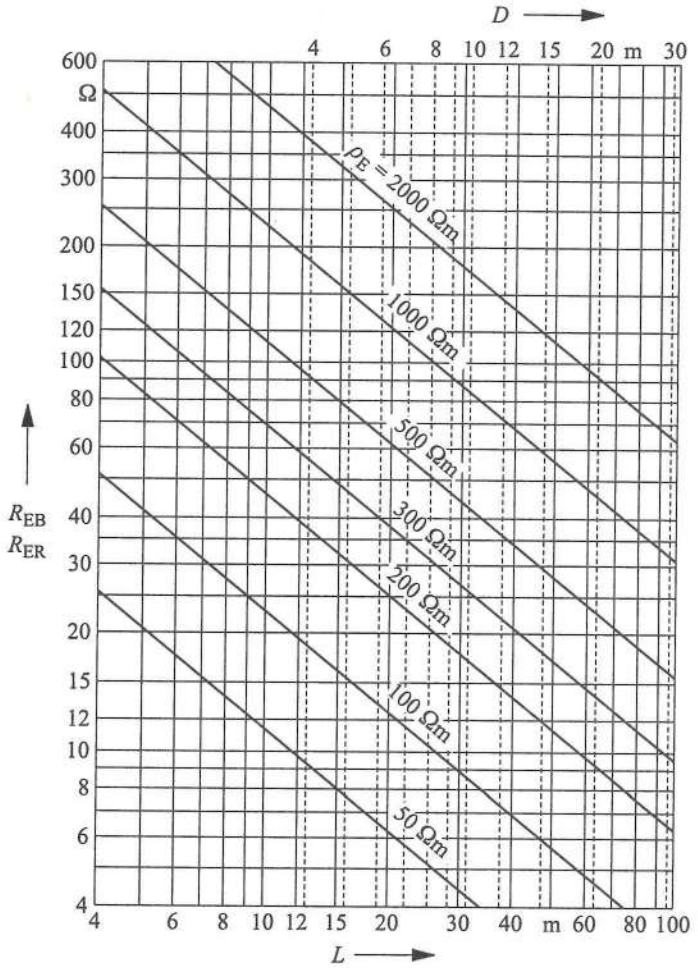
Otpor uzemljenja R_E kojeg uzemljivača ovisi o specifičnome otporu tla te dimenzijama i izvedbi uzemljivača. On uglavnom ovisi o duljini uzemljivača, a malo ovisi o njegovu presjeku. Slike K–1 i K–2 pokazuju vrijednosti otpora uzemljenja vodoravnih uzemljivača i štapnih uzemljivača u ovisnosti o ukupnoj duljini.

U slučaju vrlo dugih vodoravnih uzemljivača (npr. kabeli s uzemljivačkim učinkom) otpor uzemljenja opada s duljinom, ali teži nekoj konačnoj vrijednosti (vidjeti sliku K–3).

Temeljni uzemljivači mogu se smatrati uzemljivačima položenima u okolno tlo. Otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača približno je:

$$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$$

D je promjer kruga čija je površina jednaka površini mrežastog uzemljivača.



Sl. K–1. Otpor uzemljenja vodoravnih ravnih ili prstenastih uzemljivača (od trake, gradiva kružnog presjeka ili užeta) u homogenome tlu.

Vrijednosti su izračunate prema formulama:

Trakasti uzemljivač: $$R_{EB} = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{d}$$

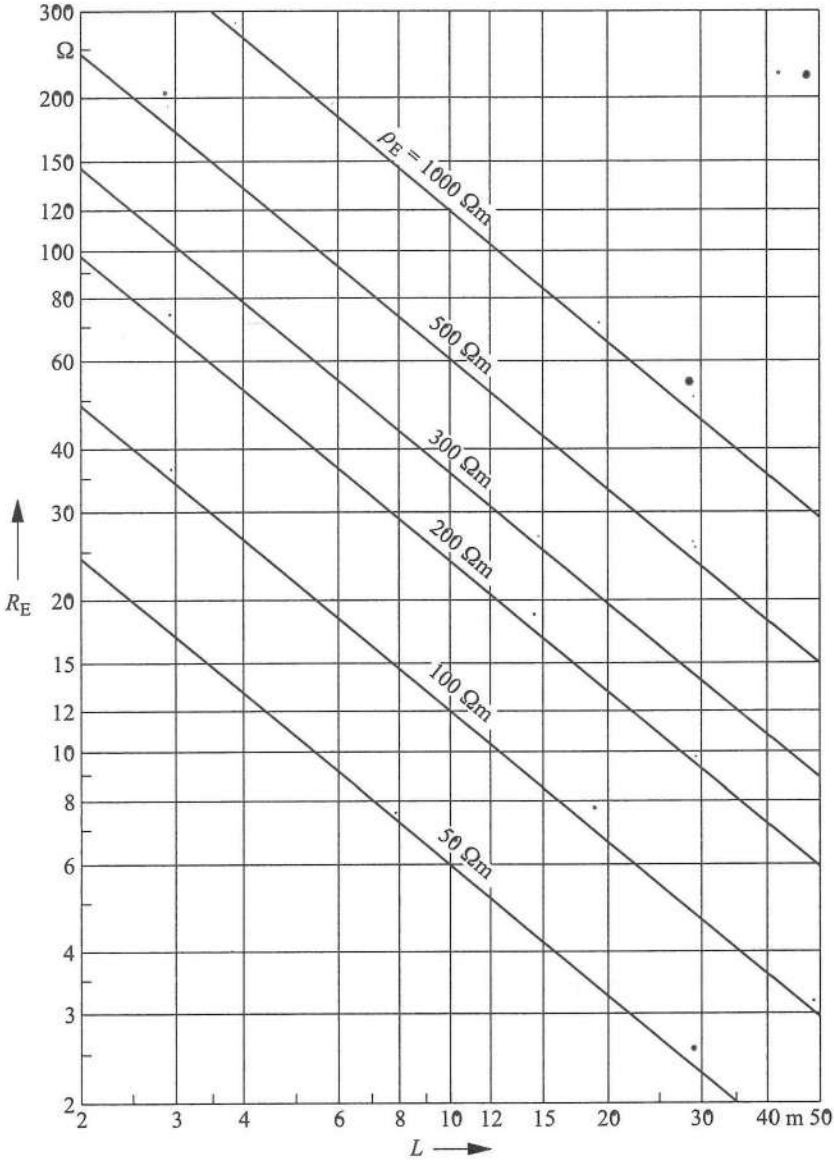
Prstenasti uzemljivač: $$R_{ER} = \frac{\rho_E}{\pi^2 D} \ln \frac{2\pi D}{d}$$

L duljina trake u m

$D = \frac{L}{\pi}$ promjer prstena u m

d promjer užeta ili pola širine trake u m (ovdje pretpostavljeno 0,015 m)

ρ_E specifični otpor tla u Ωm



Sl. K–2. Otpor uzemljenja štapnih uzemljivača okomito zabijenih u homogeno tlo.

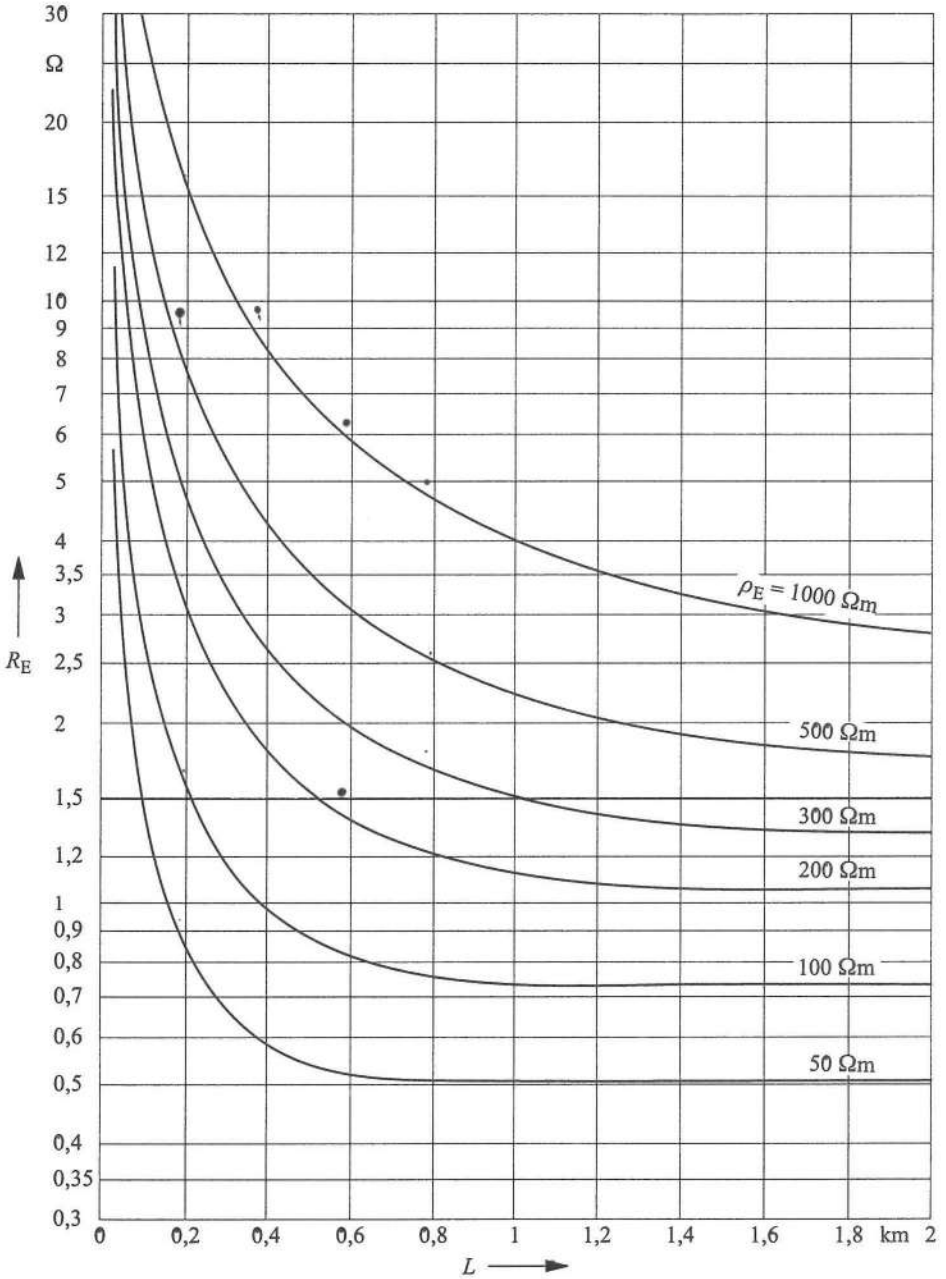
Vrijednosti su izračunate prema formuli:

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

L duljina štapa u m

d promjer štapa u m (ovdje pretpostavljeno 0,02 m)

ρ_E specifični otpor tla u Ωm



Sl. K–3. Tipične vrijednosti otpora uzemljenja kabela s uzemljivačkim učinkom u ovisnosti o duljini kabela i specifičnom otporu tla.

Dodatak L (Obavijesni)

Izvođenje uzemljivača i vodiča za uzemljenje

L.1 **Izvođenje uzemljivača**

L.1.1 Vodoravni uzemljivači

Vodoravni uzemljivači obično se polažu na dno rova ili temeljne jame.

Preporučuje se:

- da se tlo oko njih malo nabije
- da kamenje ili šljunak ne budu u izravnom dodiru s uzemljivačima
- da se prirodno tlo koje je agresivno za primijenjeni metal uzemljivača zamijeni prikladnim tlom.

L.1.2 Okomiti ili kosi štapni uzemljivači

Okomiti ili kosi štapni uzemljivači zabiju se u zemlju, a razmak među njima ne smije biti manji od duljine štapa.

kako se štapni uzemljivači ne bi pri zabijanju oštetili, moraju se za zabijanje upotrijebiti prikladni alati.

L.1.3 Spajanje uzemljivača

Spojevi koji se primjenjuju za međusobno spajanje vodljivih dijelova mrežastog uzemljivača moraju biti odgovarajućih dimenzija za postizanje električne vodljivosti i mehaničke i toplinske čvrstoće istovrijedne samim uzemljivačima.

Uzemljivači moraju biti otporni nakoroziju i ne smiju dovoditi do stvaranja galvanskih članaka.

Spojevi primijenjeni za sastavljanje štapova moraju biti iste mehaničke čvrstoće kao i štapovi te moraju podnijeti mehanička naprezanja pri zabijanju. Kad se moraju spojiti različiti metali koji stvaraju galvanske članke koji bi mogli izazvati galvansku koroziju, spojevi se moraju trajno zaštititi od dodira s elektrolitom u njihovu okolišu.

L.2 **Izvođenje zemljovoda**

Trasa zemljovoda mora općenito biti što je moguće kraća.

L.2.1 Polaganje zemljovoda

U obzir mogu doći sljedeći načini polaganja:

- Zemljovodi položeni u zemlju:
  Može biti potrebna zaštita od mehaničkog oštećenja.
- Dostupno položeni zemljovodi:
  Zemljovodi moraju se iznad zemlje položiti tako da ostanu dostupni. Ako postoji opasnost mehaničkog oštećenja, zemljovod mora se na odgovarajući način zaštititi.
- Zemljovodi položeni u beton:
  Zemljovodi mogu se položiti i u beton. Na oba kraja moraju biti lako dostupne stezaljke.

Posebna pozornost mora se posvetiti izbjegavanju korozije na mjestu ulaska golog zemljovoda u zemlju ili u beton.

L.2.2 Spajanje zemljovoda

Električni kontakt spojeva mora biti dobar kako bi se spriječilo neprihvatljivo zagrijavanje uslijed struje kvara.

Spojevi se ne smiju otpuštati i moraju biti zaštićeni od korozije. Kad se moraju spojiti različiti metali koji stvaraju galvanske članke koji mogu izazvati galvansku koroziju, spojevi se moraju trajno zaštititi od dodira s elektrolitom u njihovoj okolici.

Za spajanje zemljovoda s uzemljivačem, s glavnom stezaljkom za uzemljenje i s bilo kojim metalnim dijelom moraju se primijeniti prikladni spojnici. Može biti povoljno primijeniti rastavno/mjerne ormariće.

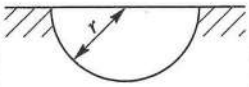
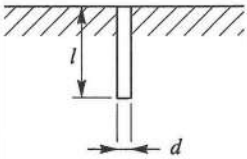
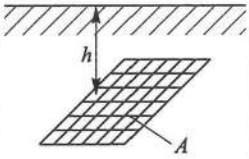
Spoj ne smije biti moguće rastaviti bez alata.

Dodatak M (Obavijesni)

Približne formule za jednostavne uzemljivačke sustave: odgovarajući razmaci za izbjegavanje opasnih potencijala

U_E potencijal uzemljenja

U_{accept} dopuštena granica potencijala površine zemlje (npr. vrijednost iz slike P9–1 ili tablice P9–2) na razmaku d_{accept} ($U_{accept} < U_E$)

Opis uzemljenja	Polukugla	Okomiti štap	Mreža u zemlji
Konfiguracija		 $l \gg d$	
Razmak d_{accept}	$r \cdot \left(\frac{U_E}{U_{accept}} - 1 \right)$	$2l \cdot \frac{c}{c^2 - 1}$ $c = \left(\frac{4l}{d} \right)^{\frac{U_{accept}}{U_E}}$ $l \gg d$	$\sqrt{\frac{A}{\pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sin \frac{\pi U_{accept}}{2U_E}} - 1 \right)$ A = površina mreže

LITERATURA

[1] Požar, H.: *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.

[2] Padelin, M.: *Zaštita od groma*, Školska knjiga, Zagreb, 1987.

[3] Kosek, Z., Valčić, J.: *Zbirka propisa za električne instalacije niskog napona*, Zavod za istraživanje i razvoj sigurnosti, Zagreb, 1977.

[4] Sakis Meliopulos, A. P.: *Power System Grounding and Transients: An Introduction*, School of Electrical Engineering, Georgi Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1988.

[5] Nahman, J.: *Analitički izraz za otpor mrežastog uzemljivača u nekom magnetnom tlu*, Savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Opatija, 1983.

[6] *Tehnički propisi o gromobranima*, Službeni list br. 13/78, Narodne Novine br. 53/91.

[7] Kurtović, M.: *Doprinos kvaliteti uzemljenja materijala koji se nalazi u kanalu oko voda uzemljivača*, XV savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Beograd, 1981.

[8] Jakelja, J.: *Uzemljivači stupova distributivnih vodova*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[9] Koch, W.: *Erdungsmassnahmen für Hochspannungarlagen mit geerdetem Stennpunkt*, Elektrotechnische Zertschrife, vol. 71, 1980.

[10] Dilberović, N., Veleder, M.: *Uzemljivači dalekovoda u raznim uslovima vodljivosti tla*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[11] ... *An American National Standard, IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial Power Systems*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, New York.

[12] Flisowski, Z.: *Zbrojane Fundamenty jako uznomy naturale urzadzenia prorunckromego*, IV Jugoslavensko savjetovanje o geoelektricitetu i gromobranima, Portorož, 1979.

[13] Lastni, N.: *Dimenzioniranje vodiča za uzemljenje i kratko spajanje vodova i sabirnice visokog napona u mreži Elektroprivrede*, Energija, Zagreb, br. 1–2, 1972.

[14] Norme: *HRN N.B2.704* i *HRN N.B2.741*.

[15] Žutobradić, S., Filipović. B.: *Izvedba uzemljivača TS 10(20)/0.4 kV priključenih na nadzemnu mrežu, 10(20) kV u uvjetima uzemljenog zvezdišta*, Energija, Zagreb, br. 1–2, 1984.

[16] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V*, Službeni list br. 4/74, Narodne novine br. 53/91.

[17] Muftić, Dž.: *Projektiranje uzemljenja objekata elektroenergetskih sistema*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1982.

[18] Kostić, M.: *Određivanje otpornosti uzemljenja sistema kvadratnih ploča, vertikalno ukopanih u homogenom tlu*, XVII savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Struga, 1985.

[19] Nakman, J.: *Uzemljenje neutralne točke distributivnih mreža*, Naučna knjiga, Beograd, 1980.

[20] Dilberović, N., Veleder M.: *Uloga armiranobetonskih temelja dalekovodnih stupova u osiguranju zahtijevane otpornosti uzemljenja stupa*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1989.

[21] Nahman, J.: *Analiza međusobnog utjecaja uzemljivača*, XIII savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1977.

[22] Zelić, J.: *Analiza napona dodira neuzemljene i uzemljene ograde elektroenergetskog postrojenja*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[23] Baymsteijna, I. A., Bažanova, S. A.: *Spravočnik po Električeskim ustanovkama visokoga napraženija*, Energoatomizdat, Moskva, 1989.

[24] Bajec, A.: *Uzemljenje električnih uređaja*, Zajednica Jugoslavenske Elektroprivrede, Beograd, 1964.

[25] Koch, W.: *Erdurgen in Wechelstromanlagen über 1 kV*, Springer V., Berlin, 1961.

[26] Milanković, Lj.: *Tehnika visokog napona*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1981.

[27] Majdandžić, F.: *Niskonaponske mreže u Elektroprivredi*, Institut Edvard Kardelj, Niš, 1983.

[28] Žutobradić, S., Filipović, B.: *Uvodni proračun impulsnih karakteristika uzemljenja*, Energija, Zagreb, br. 1, 1983.

[29] Krulc, Z.: *Vrednovanje električne otpornosti tla u zaštiti od udara munje*, Energija, Zagreb, br. 2, 1985.

[30] Novoselac, Z.: *Problem polaganja uzemljivačkih elektroda paralelno s XHP kabelima*, Energija, Zagreb, br. 1, 1983.

[31] ... Norma: *VDE 0141/7.76 – VDE Bestimmugen für Erdungen in Weckselstrom anlagen für Nennsapmnungen über 1 kV.*

[32] ... *An American National Standard, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, New York.

[33] Žutobradić, S., Haznadar, Z.: *Modeliranje parametara uzemljivača prilikom uvođenja impulsnih struja u zemlju*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1989.

[34] Vorgučić, A.: *Električna otpornost betona – vremenska zavisnost*, Savjetovanje SMEITJ – GES '80., referat 6–17.

[35] Riello, G.: *Uređaji za uzemljenje*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.

[36] Hasse, P., Wilsinger, J.: *Handbuch für bertzschutzund und erdung*, München, 1982.

[37] Krulc. Z.: *Otpornost tla i geoelektričko-geološka građa tla*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3, 1986.

[38] ... Institut za Elektroprivredu Zagreb: *Elaborat o uzemljenju elektroenergetskih objekata, br. II-0052*, Hrvatska elektroprivreda Zagreb, 1972.

[39] ... American National Standard Institute, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power System*, february 1986.

[40] Diesendorf, W.: *Insulation Coordination in High Voltage Power Systems* , Butterworths, London, 1974.

[41] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadnih trafostanica*, Službeni list br. 13/78, Narodne Novine br. 53/91.

[42] Nahman, J., Salamon, D.: *Analitički izraz za proračun otpora rasprostiranja grupe štapnih uzemljivača i kombiniranih uzemljivačkih sistema u nehomogenom tlu*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[43] Grčev, L.: *Novi pristup numeričkom modeliranju impulsnih karakteristika uzemljivačkih sistema*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[44] Sadović, S.: *Funkcioniranje uzemljivača u uslovima atmosferskog pražnjenja*, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 1988.

[45] Žutobradić, S.: *Proračun impulsnih karakteristika složenih uzemljivača*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[46] Filipović, B., Miličević, A.: *Osvrt na prijedlog novih propisa o uzemljenjima napona iznad 1 kV*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1989.

[47] Pavić, A.: *Mjerenja otpora uzemljenja mosnom metodom*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1984.

[48] Mahmutćehajić, R., Petričić, Ž.: *Novije spoznaje o karakterima zaštite od električnog udara*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1989.

[49] Žutobradić, S., Haznadar, Z.: *Modeliranje parametara uzemljivača prilikom uvođenja impulsnih struja u zemlju*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1989.

[50] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova*, Službeni list br. 51/73 i br. 11/80, Narodne Novine br. 53/91.

[51] ... *Enciklopedija zaštite na radu medicina rada*, tom I, Institut za dokumentaciju zaštite na radu Edvard Kardelj, Niš, 1982.

[52] Nakman, J., Salamon, D.: *Obrada rezultata mjerenja električnih karakteristika tla izvedenih probnom sondom*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3, 1986.

[53] Milun. S.: *Obrada rezultata geološkog sondiranja nehomogenog tla*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1984.

[54] Mijušković, N.: *Primjena proračuna optimalnog uzemljivača na računalu*, Elektrodistribucija, Beograd, br. 3, 1978.

[55] Jelovac, D.: *Proračun uzemljivačkog sistema TS VN/NN*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3, 1986.

[56] ... *Zaštita od atmosferskog pražnjenja i geoelektricitet*, Jugoslavenske i inozemne dokumentacije zaštite na radu, Niš, 1968.

[57] Zelić, J.: *Mjere za smanjenje napona dodira ograde elektroenergetskog postrojenja*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[58] Smiljanić, S.: *Duboki štapni (vertikalni) uzemljivači*, Savjetovanje SMEITJ – GES '80., G-5.

[59] Medulin, V., Skok, S., Jakl, F., Firšt, Z.: *Eksperimentalna istraživanja poboljšanja karakteristika uzemljivača*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3, 1986.

[60] ... *Uputstvo o izradi uzemljenja u telefonskim kabelskim mrežama*, PTT Vjesnik br. 22/87, Službeni list br. 18/78, Narodne Novine br. 53/91.

[61] Bojković, T.: *Problem korištenja metalnog plašta kabla kao uzemljivača i problem iznošenja potencijala IG postrojenja 110 kV s direktnom transformacijom*, V simpozij o energetskim kabelima, Zadar, 1976.

[62] Damjanić, M.: *Planiranje 10(20) kV mreže, s gledišta uzemljenja zvjezdišta, na terenima sa srednjim i teškim uvjetima uzemljenja*, Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike električne sisteme, Peto savjetovanje, Cavtat 2001.

[63] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV*, Službeni list br. 65/88, Narodne novine br. 53/91.

[64] Jacobs, A. I.: *Krasčetu električeskih karakteristik složnjih zazemlitelei*, Električestvo br. 6, 1973.

[65] ... *Pravilnik o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja*, Službeni list br. 19/68, Narodne novine br. 53/91.

[66] ... Hrvatska norma: *HD 637 S1:1999*.

[67] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za električna postrojenja i uređaje u rudnicima sa površinskom eksploatacijom mineralnih sirovina*, Službeni list br. 66/87, Narodne novine br. 53/91.

[68] ... *Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu od statičkog elektriciteta*, Službeni list br. 62/73, Narodne novine br. 53/91.

[69] Nakman, J., Vlaisavljević, G.: *Karakteristike tipskih uzemljivača TS 10/0,4 kV mreže Beograda*, XI savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Ohrid, 1972.

[70] ... Norma: *VDE 0120 Teil 1/11.71. – Leitsätze für die Berechung der kurzschlus--ströme, Drehstromanlagen mit Nennspannungen uber 1 kV*.

[71] Kučak, J.: *Ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja u Hrvatskoj*, Energija, Zagreb, br. 5, 1991.

[72] ... Norma: *VDE 0141/7.76 – 6 odredbe za uzemljenja u postrojenjima izmjenične struje nazivnog napona iznad 1 kV*, DITH, Zagreb, 1987.

[73] Keler. D., Maričić, M., Srb, V.: *Elektromonterski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987.

[74] Hukić, A.: *Proračun iznošenja potencijala iz TS 110/36/6 kV HAK putem metalnog plašta 6 kV kabela*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 1–2, 1986.

[75] Škuletić, S.: referat br. 23.05, XIII savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1977.

[76] Žutobradić, S., Rarlić, V.: *Suvremene tendencije razvoja otpornika za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža*, Energija, Zagreb, br. 1, 1997.

[77] Žutobradić, S., Puharić, M.: *Tehno-ekonomski pristup dimenzioniranja uzemljivača stupova nadzemnih vodova*, Elektrotehnika, Zagreb, br. 3–4, 1988.

POPIS SLOVNIH SIMBOLA

A površina mrežastog uzemljivača (4.6–11)

a duljina jedne stranice uzemljivača, sl. 13.2–2

a duljina kombiniranog uzemljivača sa skupinama štapnih uzemljivača, tablica 8.6–1

a faktor preopterećenja (19.6–6)

a polumjer kuglastog uzemljivača, polukuglastog uzemljivača (4.1–6), (4.1–18)

a polumjer oko uzemljivača gdje je tlo specifičnog otpora ρ_{z1}, sl. 2.6–1

a polumjer štapnog uzemljivača, sl. 4.6–2

a razmak između faznog vodiča i gromobranskog užeta (11.6–9)

a srednja udaljenost između štapnih uzemljivača, sl. 8.5–1

a širina trakastog uzemljivača, (6.2–3)

a udaljenost od sredine trakastog uzemljivača u okomitom smjeru na trasu uzemljivača (6.3–2)

A_L razmak štapnih i pločastih uzemljivača, sl. 5.3–1, tablica 5.4–1

a_{pl} duljina stranice kvadratne ploče (5.4–1)

A' lik kuglastog izmjenjivača (preslik), sl. 4.1–3

B koeficijent ovisan o obliku strujnog vala i za približnu vrijednost može se uzeti da je 2 (11.2–3)

b polumjer pločastog uzemljivača kojim se nadomješta ljudsko stopalo (3.3–1)

b razmak između faznog vodiča i gromobranskog užeta promatranje preslikavanjem u odnosu na površinu zemlje (11.6–9)

b širina kombiniranog uzemljivača obuhvaćenog skupinom štapnih uzemljivača pri izračunu $x_A = a/b$, (8.7–2), dijagram sl. 8.7–2

b udaljenost od kraja trakastog uzemljivača u uzdužnom smjeru (6.1–14) koji ima predznak »+« za udaljenost od kraja trakastog uzemljivača ka spoljašnosti i predznak »–« za udaljenost ka unutrašnjosti

b_g udaljenost između gromobranskih užadi

c faktor po formuli (10.2–12) za izračun koeficijenta K_{rr}, (10.2–11)

C_1 jedinični kapacitet impulsnog uzemljivača, tablica 11.1–1

Uz svaki slovni simbol navodi se u zagradi broj formule ili slike kada se prvi put spominje.

C_1 ulazni kapacitet kože ljudskog tijela, sl. 3.2–2
C_2 izlazni kapacitet kože ljudskog tijela, sl. 3.2–2
C_p faktor za izračun napona koraka i dodirnog napona, (10.3–1)
c_r geometrijska konstanta uzemljivača, tablica 16.2–1
c_s redukcijski faktor (3.5–10)
C_v specifična toplina otpornika na temperaturi ϑ, (19.6–3)

D promjer prstenastog uzemljivača, sl. 2.3–3
D širina korita približno polukružnog presjeka (19.4–1)
D udaljenost između mrežastih vodiča, sl. 4.6–3
D udaljenost polukuglastih uzemljivača (4.1–12)
D udaljenost paralelnih vodiča mrežastog uzemljivača, sl. 8.1–2
D vanjski promjer ekrana (električne zaštite) kabela (14.1–4)
d promjer polukugle za koju zamišljamo da je jednakog obujma kao betonski temelj u kojem je ugrađen temeljni uzemljivač (7.1–1)
d promjer vodiča uzemljivača
D_a dijagonala zaštitnog uzemljivača, tablica 18.6–1
De promjer fiktivnog vodiča povratnog puta struje kroz zemlju, (14.1–4)
D_k širina riječnog korita, (19.4–1)
d_{ms} udaljenost stopala ljudskog tijela, sl. 3.4–1
D_{nj} subdeterminanta sustava (13.1–7)
D_p promjer nadomjesnoga prstenastog uzemljivača, (9.1–2)
D_r determinanta sustava (13.1–7)
D_r računski promjer mrežastog uzemljivača izračunan u obliku horizontalne plohe (10.1–7)
D_S srednji promjer armature plašta kabela (14.1–4)
d_T ekvivalentna dubina povratnog puta struje kroz zemlju (14.1–2)
d' ekvivalentni promjer uzemljivača, sl. 2.6–3

E_k kritično polje pri kojem nastaje ionizacija tla oko uzemljivača
$\vec{E}(x,y)$ jakost električnog polja u točki s koordinatama x i y (4.1–8)

f_r faktor za proračun otpora uzemljenja velike duljine (19.1–4)
f_u faktor u kojem je definirano opadanje napona po duljini uzemljivača velike duljine (19.1–5)

G integral, (4.7–27) i rješenje integrala (4.7–28)
g faktor koji ovisi o debljini gornjeg sloja tla, H, površini uzemljivača, A, broju štapnih uzemljivača n i ekvivalentnoj duljini uzemljivača l_e (8.7–9)
g vodljivost horizontalno položenog trakastog uzemljivača (14.2–2)
G_1 jedinični odvod impulsnog uzemljivača, tablica 11.1–1
G_1 odvod impulsnog uzemljivača, sl. 11.5–3
g_{1z} vodljivost uzemljivača (19.1–1)
G_d izokeraunička razina (broj grmljavinskih dana u godini) (11.6–1)

H debljina gornjeg sloja specifičnog otpora ρ_{z1} (10.2–5)
H integral (4.7–31)
h dubina ukopa uzemljivača, (13.1–9)
h dubina ukopa uzemljivača, mjereno od gornjeg ruba uzemljivača do površine tla, sl. 4.1–3
H_1 debljina gornjeg sloja, specifičnog otpora tla ρ_{z1} dvoslojnog tla, sl. 2.7–1
h_e ekvivalentna dubina ukopa (11.4–19)
h_{gs} srednja visina gromobranskog užeta (11.6–1)
h_f visina faznog vodiča (11.6–8)
$h_š$ debljina šljunčanog sloja
h' ekvivalentna dubina ukopa (8.7–2)

I struja kroz uzemljivač (2.6–1), (6.1–1)
I_0 Besselova funkcija nultog reda
I_1 ukupna struja koja se širi iz elementa 1 u zemlju, sl. 4.5–1

I_1, I_2 struja u metalnom plaštu kabela TS1 i TS2 (14.2–4)

I_{1k} struja zemljospoja ili jednopolnoga kratkog spoja pri uzemljenju mreže srednjeg napona putem otpora (14.3–1)

i_a struja kroz štapni uzemljivač, sl. 19.5–1, tablica 19.5–1

i_a, i_b struja kroz uzemljivače a i b, (4.4–1)

$\bar{i}_a, \bar{i}_b$ matrice (kolone) struja koje se odvode s elementa uzemljivača a i b s n_a i n_b članova, (18.2–1)

i_a, i_b, i_c i i_d struje u pojedinim granama pravokutnog uzemljivača, tablice 19.5–1, sl. 19.5–1

$I_č$ struja kroz ljudsko tijelo, sl. 3.3–1

$I_{č50}$ dopuštena struja kroz ljudsko tijelo mase 50 kg (3.5–11)

$I_{č70}$ dopuštena struja kroz ljudsko tijelo mase 70 kg (3.5–12)

$I_{čd}$ struja kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira (3.3–6)

$I_{čk}$ struja kroz ljudsko tijelo u slučaju koraka (3.3–5)

I_g strujni val kroz gromobransko uže, sl. 11.6–1

I_j struja koja izlazi iz j-tog elementa

I_{kj} struja kratkog spoja u vodičima j-tog voda (20.3–10)

I_i struja munje

I_k ukupna struja jednopolnoga kratkog spoja (20.3–1)

i_k struja kvara (4.4–5)

I_{K1} efektivna vrijednost struje dozemnog kratkog spoja (12.2–8)

I_{k1} dopuštena struja kratkog spoja u vremenu od 1 sekunde (12.2–3)

I_{kj} struja kratkog spoja pojedinih vodova, (20.3–1)

I_{kmaks} dopuštena struja kratkog spoja u trajanju 1 s, tablica 12.2–1

I_{KZ} struja zemljospoja jednopolnog kratkog spoja koja se ograničava na 300 A ili 150 A ugradnjom odgovarajućeg otpora na uzemljeno svjezdište srednjonaponske mreže (13.2–1)

I_{kz} struja kvara kroz uzemljivač postrojenja (20.3–10)

I_{kzo} struja kratkog spoja pri uzimanju u obzir samo redukcijskog faktora zaštitnog užeta (20.3–4)

I_{L_z} nekompenzirana kapacitivna struja zemljospoja (19.7–6)

I_{mj} struja mjerenja (20.1–5)

I_{no} nazivna struja kroz otpornik za uzemljenje zvjezdišta mreže (19.6–2)

I_{R_z} ograničena djelatna komponenta struje zemljospoja (19.7–6)

I_s strujni val kroz dalekovodni stup, sl. 11.6–1

$i(t)$ analitički model struje munje primjenom dvostruke eksponencijalne funkcije (16.1–1)

I^T ukupna struja od n uzemljivača (4.3–5)

I_{term} termička struja kratkog spoja (12.2–4)

I_{TR} struja kratkog spoja neposredno priključenih (blok) transformatora (20.3–10)

I_{TR} struja kroz uzemljenje zvjezdišta transformatora (20.3–1)

I_{tr} dopuštena trajna struja opterećenja za vodove uzemljenja, tablica 12.1–4

I_u amplituda struja munje (11.6–2)

I_u tjemena vrijednost udarne struje groma (13.3–5)

I_u udarna struja munje, sl. 11.2–3

I_z struja zemljospoja, struja kroz uzemljivač (2.6–1)

I_{zc} kapacitivna struja zemljospoja za mrežu s izoliranom nultom točkom A/km, (12.1–1)

I_{zi} struja kroz i-ti vodič uzemljivača (13.1–3)

I_{zk} nekompenzirana struja zemljospoja kombinacijom otpornika i prigušnice (19.7–6)

$i_z(t)$ impulsna struja struja kroz uzemljivač (11.5–12)

I_{zuj} struja u zaštitnom užetu j-tog dalekovoda (20.3–2)

I'_g dio struje munje kroz gromobransko uže, sl. 11.6–1

I'_K efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja (12.2–5)

I''_k početna struja simetrična (izmjenična) struja kratkog spoja (12.2–4)

J gustoća struje kroz tlo (11.2–3)

J_c kritična gustoća struje kroz tlo (11.2–3)

K faktor zaštitnog vodiča za različite vrste kabela prema tablici 12.3–1

k faktor specifičnog otpora tla za dvoslojno tlo s različitim specifičnim otporima (3.5–5)

k redukcijski faktor zaštitnog užeta (20.3–5)

$K_1(0)$ geometrijski koeficijent prema dijagramu sl. 8.6–1 za krivulju a pri $h=0$, površinski uzemljivač

K_{11} koeficijent koji se prema [L3] izračuna: $K_{11} = 0{,}4\,l_i$ (11.6–11)

K_{22} koeficijent koji se prema [L3] izračuna: $K_{22} = 0{,}71\,l_i$ (11.6–11)

k_d relativni dodirni napon (19.5–3)

k_{dM} relativni najveći dodirni napon (19.5–4)

K_i faktor razdiobe stanja po duljini mrežastog uzemljivača (4.6–12)

K_i korekcijski faktor zbog neravnomjerne gustoće struja po vodičima mrežastog uzemljivača (8.1–11)

k_i faktor izlazećeg potencijala (14.4–2)

K_{ij} koeficijent potencijala, (13.1–3) a njegovo značenje jasno je iz jednadžbe (13.1–2)

k_j redukcijski faktor zaštitnog užeta j-tog dalekovoda (20.3–4)

K_k korekcijski faktor otpora uzemljenja (6.2–1)

K_m korekcijski faktor zbog međusobnog utjecaja N paralelnih vodiča (8.1–10)

k_{maks} najveći redukcijski faktor zaštitnog užeta za sve vodove koji su priključeni na postrojenje sa promatranim uzemljivačem (20.3–10)

K_{mY} faktor za korekciju međusobnog utjecaja paralelnih vodiča mrežastog uzemljivača po dubini koordinata y (8.1–27)

K_p korekcijski faktor zbog nehomogenosti tla za uzemljivač u gornjem sloju tla (8.6–2)

K_p korekcijski koeficijent specifičnog otpora tla (8.6–2)

k_{pl} faktor korekcije za dubinu ukopa pločastog uzemljivača do 1 m (5.4–9)

K_{pr} faktor četverokutnog uzemljivača, sl. 9.2–1

$K_{prš}$ faktor četverokutnog uzemljivača, sl. 9.2–2

K_{pt} faktor korekcije otpora temeljnog uzemljivača u obliku klupe (7.2–4)

K_s faktor korekcije otpora temeljnog uzemljivača u obliku stope (7.2–3)

K_s geometrijski faktor mrežastog uzemljivača (8.1–13)

K_s, K_m geometrijski faktori mrežastog uzemljivača (4.6–13)

K_t koeficijent za trakasti uzemljivač po formuli (6.2–5)

K_{tr} faktor za nadomjesnu duljinu uzemljivača (6.3–6)

K_{tuz} faktor korekcije otpora temeljnog uzemljivača za razdoblje uporabe uzemljivača, do 5 i iznad 5 godina, str. 155

K_u impulsni faktor uzemljivača (11.1–3), sl. 11.1–2

k' faktor međusobnog utjecaja kao uzemljivača više kabela (14.3–2)

K'_t korekcijski faktor, sl. 6.2–2 koji se uvrštava u formulu (6.2–4)

K'_p korekcijski faktor zbog nehomogenosti tla za uzemljivač koji leži u donjem sloju tla, sl. 8.6–3

L dubina ukopa štapnog uzemljivača, sl. 4.6–2

L opseg četverokuta prstenastog ili pravokutnog uzemljivača (9.1–4)

L duljina linijskog elementa uzemljivača (13.1–1)

L ukupna duljina vodiča mrežastog uzemljivača (4.6–14)

l duljina kabela (14.1–1)

l duljina uzemljivača

l duljina štapnog uzemljivača (8.6–3)

l duljina zračne mreže koja je spojena na iste sabirnice (12.1–1)

l duljina zrakastog uzemljivača, sl. 13.2–4

L_1 jedinični induktivitet impulsnog uzemljivača, tablica 11.1–1

l_1 dubina ukopa sonde u gornjem sloju debljine H_1 dvoslojnog tla

L_1, L_2 duljine dvaju paralelnih elementa uzemljivača (13.1–2)

l_1, l_2 duljina elementa 1 i 2 kao uzemljivača, sl. 4.5–1

l_2 duljina sonde u donjem sloju specifičnog otpora tla ρ_{z2}, sl. 2.7–1

l_A aktivna duljina impulsnog uzemljivača (11.1–1)

l_a ekvivalentna duljina ukopavanja sonde u dvoslojnom tlu (2.7–6)

l_c i l_d duljina strane pravokutnog uzemljivača, sl. 19.5–2

l_e ekvivalentna duljina štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu specifičnog otpora ρ_{z1} i ρ_{z2} (8.6–4)

l_i preskočni razmak (11.6–11)

l_s duljina štapnog uzemljivača, (19.5–6)

L' induktivitet vodiča uzemljivača (11.3–1)

l_ε ukupna duljina svih elemenata uzemljivača (trakastih i štapnih) (19.5–5)

M broj okana mrežastog uzemljivača

m faktor za izračun termičke (trajne) struje kratkog spoja (12.2–4)

m koeficijent za broj okana mrežastog uzemljivača M, (10.2–8)

m masa otpornika za uzemljenje zvjezdišta mreže (19.6–3)

m omjer $d/2l$ po formuli (5.1–4)

m omjer x/l za izračun otpora štapnog uzemljivača

m_1 faktor korekcije obručastog uzemljivača (19.2–2)

m_a faktor korekcije obručastog uzemljivača za dubinski uzemljivač (19.2–2)

m_b faktor korekcije uzemljivača koji se očitava iz sl. 19.2–1

m_o faktor korekcije obručastog uzemljivača za površinski uzemljivač (19.2–1)

N parametar koji ovisi o omjeru x_A, sl. 10.2–4

n broj elemenata uzemljivača (4.6–13)

n broj kabela s metalnim plaštem po formuli (14.3–2)

n broj paralelnih vodiča mrežastog uzemljivača (4.6–13)

n broj pločastih uzemljivača

n broj štapnih uzemljivača (19.5–6)

n broj traka armature kabela (14.1–2)

n faktor za izračun termičke (trajne) struje kratkog spoja (12.2–4)

n_1 broj impulsnih uzemljivača jednog tipa (11.7–4)

n_2 broj impulsnih uzemljivača drugog tipa (11.7–4)

N_g broj udara munje u nadzemni vod na 100 km duljine tijekom godine (11.6–1)

N_{isp} broj trajnih ispada dalekovoda (16.3–1)

N_{uk} očekivani broj preskoka napona na izolaciju dalekovoda (16.3–1)

P vanjski opseg mrežastog uzemljivača

p parametar, sl. 8.6–2 i sl. 8.6–3

p vjerojatnost kvara TS 10(20)/0,4 kV poglavlje 19.7.2

p vjerojatnost nastanka struje munje (11.6–2)

q razvijena toplina od struje kratkog spoja (12.2–3a)

q_1 faktor za izračun koeficijenta d (10.1–4)

$q_1, q_{0,8}$ količina razvijene topline za vrijeme trajanja kratkog spoja od 1 sekunde i 0,8 sekunde (12.2–3)

R djelatni otpor kratkospojenog strujnog kruga, (12.2–5)

r polumjer pločastog uzemljivača (4.6–11)

R_0 otpor radnog uzemljenja, sl. 13.2–13

r_0 ekvivalentni polumjer korone (11.6–10)

R_1 djelatni otpor pri struji kratkog spoja u trajanju 1 sekunde (12.2–2)

R_1 ulazni djelatni otpor kože ljudskog tijela, sl. 3.2–2

r_1 djelatni otpor vodiča uzemljivača na 1 km duljine (19.1–2)

r_1 udaljenost od središta uzemljivača, sl. 4.1–1

R_{1z} otpor uzemljenja uzemljivača duljine 1 km (19.1–1)

R_2 izlazni djelatni otpor kože ljudskog tijela, sl. 3.2–2

r_2 udaljenost od središta lika uzemljivača do određene točke, sl. 4.1–3

R_3 unutarnji djelatni otpor ljudskog tijela, sl. 3.2–2

$\overline{R}_{aa}, \overline{R}_{bb}$ kvadratne simetrične matrice s članovima $n_a \times n_a$ i $n_b \times n_b$ u kojima su u glavnim dijagonalama vlastite otpornosti elemenata uzemljivača a i b s uračunatim likom, ostali članovi međusobne su otpornosti elemenata uzemljivača a i b s uračunanim likom (18.2–1)

$\overline{R}_{ab}, \overline{R}_{ba}$ pravokutne matrice s članovima $n_a \times n_b$ koji predstavljaju međusobne otpornosti elemenata uzemljivača a i b s uračunatim likom

$\overline{R}_{ac}, \overline{R}_{ca}$ pravokutne matrice s članovima $n_a \times n_c$ koji predstavljaju međusobne otpornosti elemenata uzemljivača a i vodiča c (18.3–1)

R_B početni otpor ljudskog tijela, sl. 3.2–6

$\overline{R}_{bc}, \overline{R}_{cb}$ pravokutne matrice elemenata uzemljivača b $n_b \times n_c$ i elemenata vodiča uzemljivača c

$\overline{R}_{cc}$ kvadratna matrica s članovima $n_c \times n_c$ u kojoj su u glavnim dijagonalama vlastite otpornosti elemenata vodova s uračunanim likom, ostali članovi međusobne su otpornosti elemenata vodova s uračunanim likom (18.3–1)

r_{cm} ekvivalentni polumjer koji odgovara kritičnoj vrijednosti gustoće struja, sl. 11.2–2

$R_{\check{c}}$ otpor ljudskog tijela

r_d udaljenost dijelova elemenata do promatrane točke u prostoru (13.1–1)

R_E otpor uzemljenja zvjezdišta mreže, sl. 20.3–2

r_e ekvivalentni polumjer vodiča uzemljivača zbog ionizacije tla oko vodiča uzemljivača (11.4–19)

r_f polumjer faznog vodiča (11.6–10)

R_i impulsni otpor uzemljenja (11.1–2)

R_i udarni ili impulsni otpor uzemljenja, poglavlje 1.1

R_{i1} impulsni otpor uzemljenja za n_1 uzemljivača određenog tipa (11.7–4)

R_{i2} impulsni otpor uzemljenja za n_2 uzemljivača određenog tipa (11.7–4)

$R_{i\Sigma}$ ukupni impulsni otpor uzemljenja zbog uzajamnog utjecaja dvaju susjednih uzemljivača te povećanju ukupnog otpora uzemljenja s faktorom $1/n$ (11.7–3)

r_K redukcijski faktor kabela (14.3–1)

R_{kz} otpor uzemljenja uzemljivača položenog na dno riječnog korita (19.4–1)

R_{ms} otpor između stopala ljudskog tijela, sl. 3.4–1

R_n nazivna vrijednost otpora otpornika za uzemljenje zvijezdišta mreže (19.6–2)

R_n otpor uzemljenja stupa visokonaponskog voda za mrežu sa izoliranim zvjezdištem, (13.3–6)

$\vec{r}_{o1}, \vec{r}_{o2}$ jedinični vektori u pravcu polumjera r_1 i r_2, sl. 4.1–2

R_{oz} otpor uzemljenja površinskog obručastog uzemljivača (19.2–1)

R_{pl} djelatni otpor metalnog plašta kabela (14.1–1)

r_{pl} jedinični otpor plašta kabela (14.1–5)

R_r otpor rasprostiranja uzemljivača, poglavlje 1.1

r_r faktor uzemljenja trokutastog uzemljivača, sl. 13.2–13, i dvokonturnog uzemljivača, sl.13.2–15

r_{rf} redukcijski faktor pojnog voda (omjer struje kroz plašt ili uzemljivač pojnog voda i ukupna struja zemljospoja) (13.2–1)

R_{rs} otpor rasprostiranja ljudskog stopala (3.3–1)

R_{rsd} otpor ljudskog stopala u paralelnom spoju stopala pri dodirnom naponu, sl. 3.3–3

R_{rsk} otpor ljudskog tijela u serijskom spoju stopala pri naponu koraka, sl. 3.3–2

R_{TS} otpor uzemljenja transformatorske stanice (13.2–3)

R_{ud} otpor čovjeka u slučaju dodira (3.4–5)

R_{uk} otpor čovjeka u slučaju koraka (3.4–4)
R_{uk1} otpor uzemljenja jednog kabela (14.3–2)
R_{ukz} ukupni otpor uzemljenja više kabela s metalnim plaštem (14.3–2)
R_{up} otpor izolacije dalekovoda pri kojem će doći do povratnog preskoka (15.4–1)
R_{uz} ukupni otpor uzemljivača u dvoslojnom tlu ρ_{z1}, ρ_{z2}, (2.6–6)
R_v djelatni otpor otpornika za uzemljenje zvjezdišta mreže, pri temperaturi ϑ (19.6–3)
R_{vz} stvarni otpor uzemljenja uzemljivača velike duljine u koji je unesen i djelatni otpor vodiča uzemljivača (19.1–3)
R_z otpor uzemljenja kuglastog uzemljivača polumjera a ukopanog u dubinu h, (4.1–18)
R_z otpor uzemljenja između dvaju polukuglastih uzemljivača polumjera a i na udaljenosti D (4.1–12)
R_z otpor uzemljivača, poglavlje 1.1
R_z otpor uzemljenja polukuglastog uzemljivača (4.1–6)
R_z otpor zaštitnog uzemljenja stupa dalekovoda (13.3–5)
R_z otpor zaštitnog uzemljivača, sl. 18.7–2
r_z relativna vrijednost, koeficijent, po (2.7–14)
r_z relativni otpor uzemljenja (19.5–1)
R_{Z1}, R_{Z2} otpori uzemljenja transformatorskih stanica na koje je priključen promatrani kabel (14.1–1)
R_{zA} otpor radnog uzemljivača, sl. 18.7–2
$R_{zaš}$ otpor zaštitnog uzemljenja (19.7–2)
R_{zC} otpor uzemljenja kombiniranog uzemljivačkog sustava sastavljen od skupine štapnih i mrežastih uzemljivača (8.7–1)
R_{zc} otpor uzemljivača u cilindričnom kanalu oko trake, sl. 2.6–1
R_{zdr} otpor združenog uzemljenja (13.2–1)
$R_{zGŠ}$ otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača u homogenom tlu (8.6–1)
$R_{zGŠD}$ otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača pri prodiranju štapnih uzemljivača u donji sloj tla (8.6–3) (8.7–8)
$R_{zGŠG}$ otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača za slučaj dvoslojnog tla ako su uzemljivači samo u gornjem sloju (8.6–2)
R_{ZK} otpor uzemljenja plašta kabela (14.1–1)
R_{zm} otpor mrežastog uzemljivača (4.6–11)
R_{zMR} otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača po formuli (8.7–2)
$R_{zŠM}$ otpor uzemljenja između skupine štapnih i mrežastih uzemljivača (8.7–3)
$R_{zŠMT}$ točnija formula za izračun otpora uzemljenja između skupina štapnih i mrežastih uzemljivača (8.7–6)
R_{zv} otpor zemljovoda, poglavlje 1.1
R_{zz} ukupni otpor zaštitnog uzemljenja transformatorske stanice (13.2–2)
R' djelatni otpor vodiča uzemljivača (11.3–2)
$[r_{aa}]$ matrica otpora uzemljenja elementa a
$[r_{ab}]$ matrica međusobnih elemenata otpora uzemljenja a i b (4.4–1)
$[r_{bb}]$ matrica otpora uzemljenja elementa b (4.4–1)
$[r_{ba}]$ matrica međusobnih otpora elemenata uzemljenja b i a (4.4–1)

S presjek faznog vodiča, tablica 12.3–5
S presjek vodiča za kratko spajanje i uzemljenje (12.2–6)
S strmina struje groma (11.4–8)
S_e presjek vodiča, ekrana, kabela, sl. 14.1–2
S_{pl} presjek plašta kabela (14.1–5)
S_t površina temelja klupa i ploča temeljnog uzemljivača (7.2–4)
S_z presjek bakarnoga zaštitnog vodiča (12.2–8)
S_z presjek zaštitnog vodiča (12.2–3a)
S' srednja vrijednost strmine za struju munje amplitude I_u (11.6–3)

t vrijeme trajanja kratkog spoja, tj. prorade uređaja zaštite (12.2–8)
t vrijeme trajanja zemljospoja (10.3–3)
t vrijeme trajanja zemljospoja u kojem struja protječe kroz otpornik za uzemljenje zvjezdišta mreže (19.6–3)

T_1 vrijeme od početka do maksimalne vrijednosti impulsa, sl. 11.5–3

T_2 vrijeme od početka do opadanja vrijednosti impulsa na polovicu od najveće vrijednosti, sl. 11.5–3

$t_{B\text{maks}}$ najveće vrijeme preopterećenja otpornika za uzemljenje zvjezdišta mreže (19.6–6)

T_C kapacitivna vremenska konstanta uzemljivača (11.3–3)

$T_č$ vrijeme trajanja čela vala (11.1–1)

t_k vrijeme trajanja kratkog spoja (12.2–4)

T_L induktivna vremenska konstanta uzemljivača (11.3–2)

t_n nazivno vrijeme u kojem je dopušteno ugrijavanje otpornika za uzemljenje zvjezdišta mreže, tablica 19.6–3

T_s vrijeme prostiranja prenaponskog vala duž stupa dalekovoda (11.6–6)

T_v vremenska konstanta zagrijavanja otpornika za uzemljenje mreže (19.6–6), tablica 19.6–1

U linijski napon (12.1–1)

U napon na cilindričnom uzemljivaču polumjeru oko uzemljivača gdje je specifični otpor tla ρ_{z1}

U napon tla obručastog uzemljivača (19.3–3)

U_0 napon uzemljivača (13.1–6)

u_0 napon uzemljivača b na nultom potencijalu (4.4–13)

U_1 izmjereni napon uzemljivača pri struji I_1 (20.1–4)

U_1 napon u TS1 pri zemljospoju (14.4–1)

U_1, U_2 napon metalnog plašta kabela u transformatorskim stanicama 1 i 2 (14.2–3)

U_{12} napon između točaka 1 i 2, sl. 8.1–1

U_{1T} izmjereni najveći napon (20.1–1)

U_2 izmjereni napon uzemljivača pri promjeni smjera mjerne struje za 180° pri struji I_2 (20.1–4)

U_{2T} izmjereni najmanji napon, (20.1–1)

U_a napon zaštitnog uzemljivača, tablica 18.6–1

u_a, u_b naponi uzemljivača a i b (4.4–15)

$\bar{u}_a$, $\bar{u}_b$ matrica (kolone) napona elemenata uzemljivača s n_a i n_b članovima prema beskonačno udaljenoj zemlji koja se nalazi na nultom potencijalu (18.2–1)

U_b napon radnog uzemljivača, tablica 18.6–1

$\bar{u}_c$ matrica (kolone) napona elemenata vodiča uzemljivača na nc članovima nasuprot beskonačno udaljene zemlje koja je na nultom potencijalu (18.3–1)

U_d dodirni napon (3.1–1)

U_d dodirni napon, sl. 13.2–1

U_{da} dodirni napon iznad težišta zaštitnog uzemljivača, tablica 18.6–1

U_{dd} dopušteni dodirni napon za čovjeka (10.3–2)

U_{dg} dolazeći prenaponski val (11.6–12)

U_{dm} najveća dopuštena vrijednost dodirnog napona (10.3–4)

U_{dp} dodirni napon na ogradi spojen s metalnim prstenom (4.4–12)

U_d/I najveći relativni dodirni napon, tablica 13.4–1

U_i podnosivi udarni napon izolacije visokonaponskog voda (13.3–5)

U_k napon između točaka 0 i X od k-tog vodiča uzemljivača (8.1–4)

U_k napon koraka (3.1–3)

U_k napon koraka mrežastog uzemljivača (8.1–12)

U_{kd} dopušteni napon koraka za čovjeka (10.3–3)

U_{km} najveća dopuštena vrijednost napona koraka (10.3–4)

$U_{k\text{maks}}$ najveći napon koraka na pravcu 0–X, tablica 18.6–1

U_k/I najveći relativni napon koraka, tablica 13.4–1

U_l napon na kraju uzemljivača velike duljine l (19.1–6)

U_{mj} napon mjerenja (20.1–4)

U_{mr} napon mrežastog uzemljivača (8.1–9)

U_n nazivni linijski napon mreže (19.7–3)

U_{no} nazivni napon otpornika za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetske mreže, (19.6–1)

U_{od} odbijeni (reflektirani) prenaponski val (11.6–12)
u_r relativni napon tla (19.3–2)
U_s napon smetnje (20.1–1)
U_s napon uzemljivača, sl. 3.1–1
U_{s1} potencijal na stajalištu 1 stopala čovjeka, sl. 3.1–1
U_{s2} potencijal druge noge, sl. 3.1–2
U_T prosječni izmjereni napon (20.1–1)
U_x napon između točke 0 i X (8.1–5)
u_x relativni napon tla (6.3–5)
$U_{x(1)}$ napon od uzemljivača 1 između točaka T_1 i T_2 (8.1–3a)
U_z napon na početku uzemljivača velike duljine (19.1–6)
U_z napon uzemljivača
U_{z+1} napon na udaljenosti od 1 m, str. 52
U'_d dodirni napon po strmijoj raspodjeli B_1, sl. 3.1–1
U'_{du1} dodirni napon na unutarnjem dijelu ograde po pravcu 1, sl. 17.2–1
U'_{du1-R} unutarnji dodirni napon po pravcu 1 na rastojanju 10 m, sl. 17.2–1
U'_{du2}, U_{du2} unutarnji dodirni napon po pravcu 2 uzemljenja ograde, nakon izjednačenja potencijala i prije izjednačenja potencijala, sl. 17.5–3
U'_{du4} dodirni napon na unutarnjem dijelu ograde po pravcu 4, sl. 17.3–1
U'_{dv1} dodirni napon na vanjskom dijelu ograde na udaljenosti od 10 m po pravcu 1, sl. 17.2–1
U'_{dv1-R} vanjski dodirni napon po pravcu 1 na udaljenosti od 10 m, sl. 17.2–1
U'_{dv4} dodirni napon na vanjskom dijelu ograde po pravcu 4, sl. 17.3–1

V potencijal između polukuglastih uzemljivača (4.1–9)
V potencijal polukuglastog uzemljivača (4.1–5)
V volt sekundna karakteristika preskočnog napona na izolator (11.6–11)
V_0 potencijal mrežastog uzemljivača sa spojenim uzemljivačem ograde, sl. 17.3–1
V_0 zanemarivi potencijal naponskog lijevka kada potencijal opadne na vrijednost ≤ 5 % potencijala uzemljivača, poglavlje 3.1
V_1 potencijal u zemlji točkastog uzemljivača (4.2–13)
$V_1, V_2, \ldots, V_n$ potencijali elemenata $i = 1, 2, \ldots n$ (4.3–2)
V_2 potencijal u zraku od točkastog uzemljivača (4.2–10)
V_A potencijal u točki A (4.7–8)
V_{ab} potencijal na elementu a koji stvara struja (4.7–11)
VDF distribucijski faktor potencijala (4.3–4)
VDF_{ij} distributivni faktor potencijala ovisan o prostornoj udaljenosti i-tog i j-tog elementa
V_i potencijal od i-tog elementa u točki A (4.3–1)
V_j potencijal j-tog elementa (13.1–3)
V_{ji} potencijal na površini iznad i-tog i j-tog elementa uzemljivača (13.3–1)
V_M potencijal točke M
V_{maks} amplituda napona prenaponskog vala (16.1–2)
V_{ok} raspodjela potencijala trakastog uzemljivača u okomitom smjeru (6.3–1)
V_p potencijal metalnog prstena (4.4–12)
V_p ukupni potencijal u točki P(x, y) (13.1–11)
V_{pr} raspodjela potencijala trakastog uzemljivača u pravcu uzemljivača (6.3–4)
V_T potencijal točke T
V_t obujam temelja (7.1–2)
V_{T1} potencijal točke T1 (4.4–11)
V_U potencijal na uzemljivaču pri zemljospoju, poglavlje 19.7–2
V_{xh} potencijal u bilo kojoj točki udaljenoj x od horizontalnog odnosno vertikalnog uzemljivača, zanemarujući dubinu ukopa ($h = 0$) (13.3–2)
V_z potencijal uzemljivača, str. 35
V_{zi} potencijal na vodiču k od struje koja teče iz vodiča i elementa dz (4.7–4)
V_{zx} struja I_x koja teče iz elementa dx vodiča i i na mjestu elementa dz vodiča k stvara potencijal (4.7–3)
V'_0 potencijal ograde, sl. 17.2–1

X omjer između dopuštenoga dodirnog napona U_d i potencijala uzemljivača pri zemljospoju V_n (19.7–5)

X parametar u funkciji $F(X)$, sl. 3.5–1, $X = X_1$ (3.5–6)

x udaljenost od uzemljivača po formuli (5.1–13)

x udaljenost u okomitom smjeru na uzemljivačku traku

X_1, X_2 udaljenost točaka na površini tla u pravcu 0–X od središta zaštitnog uzemljivača, tablica 18.6–1

X_{pl} jedinična ili podužna reaktancija zbog utjecaja armature kabela (14.1–2)

X_Z reaktancija povratnog puta struje kroz zemlju (14.1–3)

x' udaljenost po duljini uzemljivačke trake

X''_d početna subtranzijentna reaktancija strujnog kruga (12.2–5)

$\overline{Y}$ poprečna admitancija plašta kabela (14.2–2)

$\overline{Z}$ impedancija ili podužna impedancija plašta kabela (14.2–1)

Z_{ag} nulta impedancija između zamki vodiča i zaštitnog užeta (20.3–5)

$\overline{Z}_c$ karakteristična impedancija metalnog plašta kabela (14.2–5)

Z_E impedancija uzemljenja zvjezdišta mreže sl. 20.3–1

Z_f valna impedancija faznog vodiča (11.6–8)

Z_g valna impedancija gromobranske užadi (11.6–7)

Z_{gf} valna impedancija između faznog i gromobranskog vodiča (11.6–9)

Z_{gz} nulta impedancija između zaštitnog užeta i zemlje (20.3–5)

Z_i impulsna impedancija uzemljenja (11.4–1)

Z_i impulsna impedancija uzemljivača (16.1–2)

Z_k valna impedancija voda pri djelovanju korone (11.6–10)

Z_s valna impedancija stupa dalekovoda (11.6–4)

Z_{sz} impedancija (otpor) uzemljenja dalekovodnog stupa (11.6–13)

Z_t impedancija ljudskog tijela, tablica 3.2–1

$Z_t(j\omega)$ ulazna impedancija impulsnog uzemljivača (11.5–2)

$Z_t(t)$ tranzijentna impedancija uzemljivačkog sustava

$\overline{Z}_{uk}$ ukupna impedancija uzemljenja metalnog plašta kabela (14.2–6)

$\overline{Z}_{ukg}$ granična impedancija uzemljenja kabela (14.2–8)

Z_{uz} impedancija uzemljenja stanice (20.3–8)

Z_v valna impedancija dalekovoda (20.3–8)

α faktor za raspodjelu potencijala u okomitom smjeru na trasu trakastog uzemljivača (6.3–2)

α koeficijent dvostruke eksponencijalne funkcije impulsne struje, (11.5–12) ili struje munje (16.1–2)

α_1 temperaturni koeficijent

α_i impulsni koeficijent uzemljenja (11.5–1)

β faktor odvoda sustava uzemljenja (20.3–6)

β faktor raspodjele potencijala u okomitom smjeru na trasu uzemljivača (6.3–4)

β koeficijent odbijanja prenaponskog vala u točki promjene valnog otpora (D) (11.6–12)

β parametar kojim se modelira dvostruka eksponencijalna funkcija struje munje (16.1–1)

β_j faktor odvoda j-tog dalekovoda (20.3–3)

γ faktor za proračun naponskog lijevka obručastog uzemljivača (19.3–2)

$\overline{\gamma}$ koeficijent prostiranja (14.2–3)

δ faktor za izračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača (10.1–3)

δ_s površinska gustoća struje (8.1–2)

ε dielektrična konstanta

η_u koeficijent iskorištenja uzemljivača za različite vrste uzemljivača (11.7–3)

ϑ temperatura otpornika u trenutku t (19.6–3)

ϑ_0 početna temperatura ugrijavanja bakrenog zemljovoda , sl. 12.2–4

ϑ_0 početna temperatura otpornika (19.6–3)

ϑ_1 dopuštena temperatura ugrijavanja bakrenog zemljovoda, sl. 12.2–4

κ faktor po formuli (19.1–2)

λ udaljenost, sl. 6.1–2

μ_{Fe} relativna permeabilnost armature kabela (14.1–2)

μ_{pl} relativna permeabilnost ekrana kabela (14.1–3)

ρ specifični otpor vodiča uzemljivača (željeza ili bakra), (11.4–2)

ρ_{Fe} specifični otpor željeza, poglavlje 1.1

ρ_{pl} specifični otpor plašta kabela (14.1–5)

$\rho_{\check{s}}$ specifični otpor šljunka

ρ_v specifični otpor vode (19.4–1)

ρ_z specifični otpor zemlje, tla, poglavlje 1.1

ρ_{z0} specifični otpor tla pri gustoći struje koja je manja od kritične (11.2–1)

ρ_{z1} specifični otpor tla za polumjer a oko uzemljivača, sl. 2.6–1

ρ_{z10} specifični otpor tla kada je gustoća struje jednaka kritičnoj gustoći struje tla, $J = J_c$ (11.2–6)

ρ_{z2} specifični otpor tla izvan polumjera uzemljivača a, sl. 2.6–1

ρ_{zi} izmjerena vrijednost specifičnog otpora tla

ρ_e specifični otpor vodiča ekrana kabela (14.1–6)

τ vrijeme putovanja vala po vodu uzemljivača duljine l (11.4–11)

τ_2 deionizacijska vremenska konstantta (11.2–2)

τ_i ionizacijska vremenska konstanta koja ovisi o vrsti tla (11.2–1)

KAZALO

Aktivna duljina impulsnog uzemljivača, 223, 225–229
analitičko modeliranje tranzijentnih karakteristika uzemljivača i praktični proračun impulsne impedancije uzemljenja, 237
analiza dodirnog napona – uzemljena ograda elektroenergetskog postrojenja, 361–364
analiza dodirnog napona – neuzemljena ograda elektroenergetskog postrojenja, 359–361
analiza dodirnog napona na ogradi elektroenergetskog postrojenja, 359
analiza proračuna impulsnog otpora uzemljenja i praktični napuci, 227
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – galvanski odvojeni uzemljivači, 376
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – galvanski odvojeni zaštitni i radni uzemljivači, 378, 379
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – međusobno spojeni uzemljivači, 376, 384–386
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – radni uzemljivač na nultom potencijalu, 376, 381–384
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – tipični radni i zaštitni uzemljivači, 378
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – tipični radni i zaštitni uzemljivači galvanski odvojeni, 379, 380
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 – zaštitni uzemljivači i kabel s neizoliranim vodljivim omotačem, 377
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 primjenom računala i mjerenjem u elektrolitskoj kadi, 373, 374
analiza uvjeta uzemljenja TS *X*/0,4 sastavljeni zaštitni i radni uzemljivači, 374
armirani temelji kao temeljni uzemljivači gromobranske instalacije 152

Bentonit, 22
broj preskoka na godinu na dalekovodu 110(35) kV, 356
broj udara groma u nadzemni vod na 100 km tijekom godine, 257

Crveni mulj, 22

Definiranje pojmova uzemljivača i sustava uzemljenja, 5
definiranje površinskog i dubinskog trakastog uzemljivača, 132

dijagram za približno izračunavanje impulsnog faktora K_u, 224
dimenzioniranje presjeka vodiča zemljovoda, 284
dinamičko modeliranje impulsnih uzemljivača, 229
distribucijski faktor potencijala (*VDF*), 75
djelatni otpor metalnog plašta kabela, 327
dodirni napon, 3
dodirni napon i napon koraka, 47
doprinos armiranobetonskih temelja smanjenju otpora uzemljenja, 339
dopuštena struja kratkog spoja za vodove uzemljenja, 281, 282
dopušteni dodirni napon u ovisnosti o trajanju kvara, 36
dopušteni dodirni napon u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja izvan postrojenja, 35
dopušteni dodirni napon u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja unutar postrojenja, 35
dopušteni dodirni napon za niskonaponske mreže i instalacije u ovisnosti o trajanju kvara, 36
dopušteni napon dodira za čovjeka normiran na masu 70 kg, 211
dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja izvan postrojenja, 35
dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja na prometnim površinama, 35
dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja unutar i izvan postrojenja, 35
dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja unutar postrojenja na otvorenom, 35
dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju struje zemljospoja na uporabu izoliranih cipela, 35
dozemni kratki spoj, 7
dubina puta struje kroz zemlju, 326
duboki štapni (okomiti) uzemljivač, 121
dva polukuglasta uzemljivača položena na površini zemlje, 66
dvostruki ili višestruki zemljospoj, 7

Eksperimentalni uzemljivači na dalekovodima 110 kV, 340, 341
eksperimentalni uzemljivači na posebnom poligonu, 344
ekvivalentna duljina ukopavanja sonde u dvoslojnom tlu, ako je sonda ukopana u oba sloja, 29
ekvivalentni vodič, 27
električne opekline, 63
električni otpor tijela, 61
elementi su međusobno mimoilazni, *VDF* faktori, 105

Faktor α za proračun naponskog lijevka trakastog uzemljivača u okomitom smjeru, 140
faktor β za proračun naponskog lijevka trakastog uzemljivača u uzdužnom smjeru, 142
faktor C_p za izračun dodirnog napona i napona koraka mrežastog uzemljivača, 210
faktor izlazećeg potencijala, 336, 337
faktor korekcije ΔK_t za trakasti uzemljivač, 139
faktor korekcije otpora uzemljenja temeljnog uzemljivača, 156
faktor K_p za proračun otpora uzemljenja u nehomogenom tlu skupine štapnih uzemljivača, 185
faktor K_p za proračun otpora uzemljivača koji leže u gornjem sloju, 186, 187
faktor K_{pr} četverokutnog uzemljivača, 198
faktor $K_{prš}$ četverokutnog uzemljivača od okruglog čelika, 199
faktor $K_š$ za računanje otpora uzemljenja štapnog uzemljivača, 114
faktor K_t za trakasti uzemljivač, 138
faktor K_{tr} za nadomjesnu duljinu uzemljivača, 142
faktor K_u za proračun impulsnog otpora uzemljenja, 223

faktor srca za različite strujne puteve, 45
faktori za proračun otpora uzemljenja obručnog uzemljivača, 391
faktori K_1, K_2 za proračun mrežastog uzemljivača, 204
faktori koji utječu na impedanciju tijela, 44
faktori za proračun otpora uzemljivača velike duljine, 388
fiziologija električnog udara, 37

Geometrijska konstanta uzemljivača stupa dalekovoda c_r, 355
geometrijski faktori mrežastog uzemljivača, 96
geometrijski koeficijent za proračun otpora uzemljenja skupine štapnih uzemljivača K_1, 184
gromobransko uzemljenje, 4

Impedancija tijela, 40
impedancija uzemljenja kabela, 331, 332
impulsna impedancija za štapni uzemljivač po Gupti, 234
impulsni koeficijenti α_i za tipove uzemljivača stupova dalekovoda, 354
impulsni otpor uzemljenja (udarni otpor uzemljenja), 2
impulsni otpor uzemljenja R_i štapnog uzemljivača, 231
impulsni otpor zemljivača R_i stupova nadzemnih vodova, 351, 352
impulsni uzemljivači u elektroenergetskom sustavu, 254
integracijsko-matrična metoda, 80
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova, 346
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u Francuskoj, 347
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u Hrvatskoj, 348
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u Mađarskoj, 347
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u SR Njemačkoj, 347, 348
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u Ruskoj Federaciji 346, 347
iskustva nekih zemalja s uzemljivanjem dalekovodnih stupova – u SAD-u, 348, 349
ispitivanje promjena otpora uzemljenja betonskih uzoraka, 344, 345
ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja visokog napona, 417
ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja visokog napona – kratki spoj u neposrednoj blizini postrojenja, 425
ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja visokog napona – kratki spoj u postrojenju, 423
ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja visokog napona – metoda mjerenja, 417–418
ispitivanje uzemljenja elektroenergetkih postrojenja visokog napona – osvrt na propise i preporuke, 425
ispitivanje uzemljenja elektroenergetkih postrojenja visokog napona – utjecaj faktora za dimenzioniranje postrojenja i uzemljivača, 421
ispitivanje uzemljenja elektroenergetskih postrojenja visokog napona – za *U–I* metode, 419
izračun distribucijskih faktora potencijala *VDF* za međusobni utjecaj dvaju uzemljivača, 80
izračun distribucijskih faktora potencijala *VDF* za trakasti uzemljivač, 89
izračun otpora ljudskog stopala zanemarujući uzajamni otpor između stopala, 57
izračun otpora uzemljenja nekih uzemljivača s pomoću distribucijskih faktora potencijala, 91
izračun otpora uzemljenja po različitim formulama mrežastog uzemljivača za jednoslojno i dvoslojno tlo, 211

izračun potencijala za n paralelnih uspravnih uzemljivača, 85
izračun struje koja prolazi kroz ljudsko tijelo za slučaj dodira (ruka – ruka), 60
izračuni impulsnog otpora uzemljenja R_i za različite duljine trakastog zemljivača, otpornosti tla i trajanje čela voda, 224
izrada uzemljenja stupova za zaštitu od atmosferskih pražnjenja, 307
izvedba uzemljivača u TS 10(20)/0,4 kV u uvjetima uzemljenog zvjezdišta putem otpornika, s ograničenjem struje zamljospoja na vrijednost 150 ili 300 A, 290
izvođenje radnog i zaštitnog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV uvjetima uzemljenog zvjezdišta 10(20) kV mreže sa združenim, odnosno odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem, 295
izvođenje uzemljenja linijskog rastavljača s oblikovanjem potencijala na manipulativnoj površini, 302–305

Jakost električnog udara, 61

Kapacitivna struja zemljospoja, 7
kapacitivna struja zemljospoja I_{zc} za kabelsku mrežu s izoliranom nul-točkom, 278
karakteristike tipskih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih i štapnih uzemljivača, 396–398
karakteristike tipskih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih, štapnih i pravokutnih uzemljivača, 399
karakteristike tipskih uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV u kombinaciji trakastih, štapnih i pravoktnih uzemljivača i dodirnog napona, 400
karakteristike tipskih uzemljivača TS 10(20)/04 kV u kombinaciji trakastih, štapnih i u obliku trokuta uzemljivača, 401, 402
koeficijent iskorištenja kombiniranog uzemljivača izveden sa zrakastim uzemljivačima, 169
koeficijent iskorištenja složenih trakastih uzemljivača, 143
koeficijent iskorištenja trakastih i štapnih uzemljivača za struje frekvencije 50 Hz, 144
koeficijent iskorištenja trakastih i štapnih uzemljivača za impulsne struje, 144
koeficijent odbijanja prenaponskog vala, 261
kombinirani uzemljivač izveden sa zrakastim uzemljivačima pod pravim kutom, 168
kombinirani uzemljivači s mrežastim i štapnim uzemljivačima, 189
kombinirani uzemljivači sa skupinama štapnih uzemljivača, 184
konstrukcija različitih trakastih i složenih impulsnih uzemljivača 243–245
korekcija mjernih rezultata otpora uzemljenja, 17
korekcijski faktor četverokutnog uzemljivača, 198
korekcijski faktor K_{rr} za mrežasti uzemljivač, 190
korekcijski faktor mrežastog uzemljivača sastavljenog od N paralelnih vodiča za dubinu ukopa h i promjer vodiča d, 166
korekcijski faktor mrežastog uzemljivača zbog neravnomjerne gustoće struje po vodičima uzemljivača, 161
korekcijski faktor zbog međusobnog utjecaja N paralelnih vodiča mrežastog uzemljivača, 162
korekcijski faktor spojnog voda, 291
korekcijski koeficijent otpornosti tla, 14
korekcijski koeficijent otpornosti tla za različite dubine ukopa uzemljivača, 15
kritična jakost električnog polja, 236
kuglasti uzemljivač ukopan u zemlju, 68

Matrična metoda za analizu sustava uzemljenja, 73
matrični model uzemljivača, 76
međusobni otpori uzemljenja za uspravni raspored elemenata uzemljivača, 101
međusobni otpori za usporedno i uspravno postavljene uzemljivače, 96

mjere za smanjenje dodirnog napona ograde elektroenergetskih postrojenja, 365
mjere za smanjenje dodirnog napona ograde elektroenergetskih postrojenja – kombinirane mjere, 370
mjere za smanjenje dodirnog napona ograde elektroenergetskih postrojenja sa izjednačenjem potencijala na rubovima ograde, 366
mjere za smanjenje dodirnog napona ograde elektroenergetskih postrojenja sa izjednačenjem potencijala na srednjem dijelu ograde, 367, 368
mjerenje otpornosti tla u dvoslojnom tlu pomoću probne sonde, 28
mrežasti uzemljivač, 95, 201
mrežasti uzemljivač s N jednako razmaknutih paralelnih vodiča, 160
mrežasti uzemljivač sastavljen od trakastih i štapnih uzemljivača, 167

Način izvođenja zaštitnog i radnog uzemljenja na TS 10(20)/04 kV, 296–300
način poboljšanja električne vodljivosti tla, 21
nadomjesna električna shema tijela, 41
nadomjesna shema za put struje kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira, 53
nadomjesna shema za put struje kroz ljudsko tijelo u slučaju koraka, 53
napon fibrilacije, 47
napon koraka, 3
napon koraka mrežastog uzemljivača, 162
napon koraka štapnog uzemljivača, 113
napon uzemljivača, 6, 35
naponska ovisnost impedancije tijela za strujni put ruka – ruka, 45
naponski ljevak, 6
naprave za kratko spajanje i uzemljenje radova, sabirnica visokog i niskog napona, 280
napuci za projektiranje i izradu uzemljivača ograde elektroenergetskog postrojenja, 364, 365
napuci za projektiranje i održavanje uzemljenja stupova dalekovoda s aspekta povratnog napona preskoka, 262
napuci za projektiranje i održavanje uzemljivača na posebnim objektima, 323
napuci za projektiranje uzemljenja stupova dalekovoda, 349
napuci za projektiranje uzemljivača, 290
napuci za smanjenje dodirnog napona na ogradi elektroenergetskog postrojenja, 370
neki napuci za projektiranje i proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i, 241
numerička metoda proračuna sustava uzemljenja, 75

Određivanje otpora uzemljenja pomoću dijagrama, 113
određivanje otpora uzemljenja upotrebom dijagrama $R_z = f(\rho_z/K_{sl})$, 114
okomito ukopani uzemljivači, 109
opća formula za približni proračun otpora mrežastog zemljivača, 203
opća svojstva dodatnih materijala za poboljšanje otpornosti tla, 22–24
općenito o uzemljenju, 1
opekline od pražnjenja, 63
orijentacijska karta otpornosti tla na dubini 1 m na području Hrvatske, 13
osnove numeričkih metoda za analizu sustava uzemljenja, 70
otpor ljudskog stopala pri dodirnom naponu, 50
otpor ljudskog stopala pri naponu koraka, 50
otpor ljudskog stopala u paralelnom spoju stopala, 49
otpor rasprostiranja, 2
otpor uzemljenja, 2
otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača ako štapovi prodiru u donji sloj tla, 186
otpor uzemljenja skupine štapnih uzemljivača u homogenom tlu, 185
otpor uzemljenja armirano-betonskog stupa, 116

otpor uzemljenja između dva polukuglasta uzemljivača, 68
otpor uzemljenja kombiniranog uzemljivača s četiri zrakasta uzemljivača, 169
otpor uzemljenja kombiniranog uzemljivačkog sustava koji se sastoji od skupine mrežastih uzemljivača, 190
otpor uzemljenja kuglastog uzemljivača polumjera *a* ukopanog u dubinu *h*, 69
otpor uzemljenja metalne ploče jednostrane površine do 1 m^2, 128
otpor uzemljenja metalne ploče na dubini ukopa gornjeg ruba ploče u ravnini zemlje, 128
otpor uzemljenja metalne ploče prema [6], 128
otpor uzemljenja metalne ploče za dubinu ukopa veću od 0,5 m, 128
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača za različite dubine ukopa i omjere duljine i širine mrežastog uzemljivača, 202
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivačkog sustava koji se sastoji od skupine štapnih i mrežastih uzemljivača, 190
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača po poboljšanoj Laurentovoj formuli, 206
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača pretpostavljenog da je oblika kružne ploče, 202
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača primjenom Ollendorf-Laurentove formule, 202
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača u dvoslojnom tlu sastavljenog od mrežastih i štapnih uzemljivača, 193
otpor uzemljenja mrežastog uzemljivača za vodoravne uzemljivačke mreže koje leže na gornjem sloju tla, 190
otpor uzemljenja obručastog uzemljivača po površini tla, 389
otpor uzemljenja obručastog uzemljivača ukopanog u dubinu *h*, 391
otpor uzemljenja paralelno spojenih štapnih uzemljivača, 181
otpor uzemljenja polukuglastog uzemljivača, 66
otpor uzemljenja prstenstog uzemljivača, 196
otpor uzemljenja prstenastog uzemljivača četverokutnog oblika (točniji izračun), 197
otpor uzemljenja prstenastog uzemljivača četverokutnog oblika, 197
otpor uzemljenja štapnog uzemljivača, 112
otpor uzemljenja štapnog uzemljivača ukopanog na određenu dubinu od površine tla, 116
otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača, 150
otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača oblika temeljne stope ili klupe, 153
otpor uzemljenja trakastog uzemljivača duljine *l*, promjera *d* položenog na dubinu *h*, 137
otpor uzemljenja trakastog uzemljivača računat pomoću faktora K_l,138
otpor uzemljenja trakastog uzemljivača računat pomoću faktora K_{tr}, 142
otpor uzemljenja trakastog uzemljivača ukopanog na dubinu *h*, 135
otpor uzemljenja trakastog uzemljivača ukopanog uz površinu zemlje, 134
otpor uzemljenja uzemljivača sastavljenog od *n* paralelnih trakastih uzemljivača, 172
otpor uzemljenja vodoravnog mrežastog uzemljivača prema Laurentovoj formuli, 205
otpor uzemljenja vodoravnog mrežastog uzemljivača u dvoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule, 206
otpor uzemljenja vodoravnog mrežastog uzemljivača u jednoslojnom tlu uporabom Schwarzove formule, 209
otpor uzemljenja vodoravnog mrežastog uzemljivača u nehomogenom tlu, 206
otpor uzemljivača velike duljine, 388
otpor zemljovoda, 2
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža, 402
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – iskustva svjetskih proizvođača, 406

otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – karakteristike metalnih otpornika, 405
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – karakteristike materijala, 405
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – nazivni napon i otpor, 403
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – osnovne karakteristike, 407
otpornik za uzemljenje zvjezdišta elektroenergetskih mreža – sažetak, 408
otpornost tla (specifični otpor tla), 3, 9
ovisnost impedancije tijela o površini i dodirnom naponu za različite površine dodira, 46
ovisnost impedancije tijela o temperaturi pri postupnom porastu a zatim smanjenju temperature tijela, 46
ovisnost impulsnog otpora uzemljenja R_i o udarnoj struji munje, 233
ovisnost otpornosti tla od postotka soli, vlage i temperature, 16
ovisnost sinusne struje otpuštanja o frekvenciji, 43

Paralelno spojeni štapni uzemljivači, 181
parametri štapnih i trakastih impulsnih uzemljivača, 221
parametri uzemljenog vodiča po Rudenbergu, 234
plašt kabela kao uzemljivač i iznošenje potencijala, 330
pločasti uzemljivač, 127
podaci o izračunu otpora uzemljenja različitih štapnih uzemljivača, 117–119
podaci o otpornosti tla, vode i drugih materijala, 9
podužna impedancija plašta kabela, 329
pogonsko (radno) uzemljenje, 3
polukuglasti i kuglasti uzemljivač, 65
posebni uvjeti za izvođenje uzemljenja na površinskom kopu, 317–322
posebni uzemljivači velike duljine, 387
posebni zahtjevi za smanjenje dodirnog napona i napona koraka na stupovima distribucijskih dalekovoda 309
potencijal između polukuglastih uzemljivača, 67, 68
potencijal mrežastog uzemljivača na površini zemlje, 166
potencijal mrežastog uzemljivača sastavljenog od trakastih i štapnih uzemljivača, 167
potencijal polukuglastog uzemljivača, 66
potencijal točkastog izvora u homogenom tlu, 110
potencijal trakastog uzemljivača na pravcu okomitom na uzemljivač, 136, 139
potencijal trakastog uzemljivača na udaljenosti *b* u smjeru uzemljivača, 136, 140
potencijal u sredini cijevi u ravnini površine tla, 111
potencijal u točki B uzimajući u obzir utjecaj okomitih štapnih uzemljivača, 181
potencijal uzemljivača, 35
prag napona i struje fibrilacije, 39
pregled ovisnosti korozijske agresivnosti tla o otpornosti tla, 19
preostala struja zemljospoja, 7
približni izračun impulsnog otpora uzemljenja, 222
približni izračun impulsnog otpora štapnog i trakastog uzemljivača, 220
približni izrazi za otpor uzemljenja okomite sonde u dvoslojnom tlu, 28
približni proračun mrežastog uzemljivača oblika vodoravne plohe, 203
primjena metalnog plašta kabela kao uzemljivača, 324, 329
primjeri izračuna impulsnog otpora uzemljenja stupova dalekovoda za različite konstrukcije uzemljivača, 352
problemi iznošenja potencijala iz postrojenja, 335
procjena korozijske agresivnosti tla, 18
projektiranje uzemljivača elektroenergetskih objekata, 286

promjena otpora temeljnog uzemljivača tijekom eksploatacije, 156
promjena otpornosti tla u ovisnosti o godišnjem dobu, 15
promjena otpornosti tla – u ovisnosti o gustoći struje oko uzemljivača, 229
proračun impulsne impedancije uzemljenja Z_i, 236
proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i različitih uzemljivača uporabom koeficijenta iskorištenja uzemljivača i impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i, 272
proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i trakastog zemljivača uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i, 269
proračun impulsnog otpora uzemljenja R_i za prstenasti i kvadratni uzemljivač uporabom impulsnog koeficijenta uzemljenja α_i, 272
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za mrežasti uzemljivač TS 110/10 kV, 461–467
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za različite vrste uzemljivača, 427
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za trakasti zemljivač u obliku trokuta sa štapnim uzemljivačima na kutevima, 455–457
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje montažne betonske transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV za struju zemljospoja 300 A s dvokonturnim uzemljivačem i četiri štapna (cijevna) uzemljivača, 450–454
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje montažne betonske transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV za struju zemljospoja 300 A s dvokonturnim uzemljivačem i četiri zrakasta uzemljivača 446–450
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje stupa dalekovoda 110 kV 458–460
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri štapna uzemljivača za struju zemljospoja 300 A, 439–442
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV s dvokonturnim uzemljivačem i s četiri zrakasta uzemljivača za struju zemljospoja 300 A, 435–438
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV za izoliranu neutralnu točku, 427–431
proračun otpora i razdioba potencijala primjenom programskog paketa CYMGRN za uzemljenje stupne TS 10(20)/0,4 kV za uzemljenu neutralnu točku pri struji zemljospoja 300 A, 431–434
proračun otpora uzemljenja uzemljivača i raspodjela potencijala matričnim metodama 78–80
proračun razdiobe potencijala i iznošenje potencijala u instalaciju niskog napona na primjeru zajedničkog i odvojenog radnog i zaštitnog uzemljenja TS X/0,4 kV, 372
proračun termičke struje kratkog spoja, 282
prstenasti uzemljivači, 196
prva pomoć, 64

Raspodjela potencijala oko uzemljivača i dodirni napon, 33
raspodjela potencijala oko uzemljivača i napon koraka, 34
različite formule za izračun otpora trakastih uzemljivača, 146
reakcija tijela na priključeni napon, 42
reaktancija armature kabela, 326

reaktancija povratnog puta struje kroz zemlju, 326
redukcijski faktor kabela, 325, 334
redukcijski faktor $K_{rš}$, 181
relativni napon tla, 140
relativni napon zemljišta na udaljenosti x od uzemljivača, 124
rezultati mjerenja otpora uzemljivača stupova 110 kV dalekovoda, 342, 343

Sastavljeni uzemljivači, 159
sezonske promjene otpornosti tla i korekcijski koeficijent, 14
smanjenje opasnosti od dodirnog napona i napona koraka nasipanjem površine tla šljunčanim slojem, 55
specifična svojstva građe tla, 18
struja kratkog spoja za kabele XHE i XHP, 328
struja kroz ljudsko tijelo u slučaju dodira, 51, 53
struja kroz ljudsko tijelo u slučaju koraka, 51, 53
struja otpuštanja i smrt od asfiksije, 61
struja zemljospoja, 2
strujni krug kroz noge ljudskog tijela pri naponu koraka, 49

Štapni zemljivač, 93, 109

Temeljni uzemljivač, 150
teoretske postavke za izračun otpora uzemljenja, 65
teorijske osnove za trakasti uzemljivač, 132
tipovi temelja, 152
tipski uzemljivač stupova distributivnih dalekovoda i proračun napona dodira i koraka, 312–315
tipski uzemljivač čelično-rešetkastih stupova distributivnih dalekovoda, 306
trakasti uzemljivač, 92, 132
tranzijentna impedancija uzemljivačkog sustava $Z_t(t)$, 250
tranzijentne karakteristike impulsnih uzemljivača, 249, 256, 257

Ugroženost temeljnog uzemljivača, 157
ukupna impedancija metalnog plašta kabela, 330, 331
ukupni otpor strujnog kruga R_{ud} u slučaju dodira, 53
ukupni otpor strujnog kruga R_{uk} u slučaju koraka, 53
ukupni otpor uzemljenja pločastih uzemljivača, 129
ukupni otpor uzemljenja sastavljen od više štapnih uzemljivača, 127
ukupni otpor uzemljenja složenog pločastog uzemljivača sastavljenog od više ploča, 130
ukupni otpor zaštitnog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV, 291
ukupni otpor združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV, 291
usporedba praga napona i struje fibrilacije prema IEEE i IEC kriterijima, 39
usporedni elementi uzemljivača u prostoru, 100
usporedni uzemljivači u ravnini, 78
utjecaj impulsnog otpora stupova dalekovoda 110 kV na broj preskoka (trajnih ispada) voda, 355
utjecaj ionizacije tla oko uzemljivača na impulsnu impedanciju uzemljivača Z_i, 240
utjecaj materijala oko uzemljivača na promjenu otpora uzemljenja, 24
utjecaj sloja šljunka na smanjenje struje kroz čovjeka, 55
uvjeti uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže putem kombinacije otpornik–prigušnica, 413–415
uvjeti uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže putem otpornika, 410, 411
uvjeti uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreže putem otpornika – alternativna rješenja, 413
uzajamni otpor između stopala ljudskog tijela, 53
uzemljenje ograde elektroenergetskog postrojenja i mjere za smanjenje dodirnog napona, 358

uzemljenje stupa dalekovoda i povratni napon preskoka, 256
uzemljenje zvjezdišta srednjonaponske mreže 10(20) kV kombinacijom otpornik–prigušnica za područja s visokom otpornošću tla, 409, 410
uzemljivač sastavljen od *n* paralelnih trakastih zemljivača, 170
uzemljivač sastavljen od okomitih štapnih uzemljivača, 179
uzemljivač sastavljen od štapnih uzemljivača, 125
uzemljivač u riječnom koritu, 395
uzemljivač u riječnom koritu – otpor uzemljenja, 395
uzemljivači instalacije za zaštitu od atmosferskih pražnjenja, 220

Valna impedancija dalekovoda pri djelovanju korone, 260
valna impedancija faznog vodiča dalekovoda, 259
valna impedancija stupa dalekovoda, 259
ventikularna fibrilacija, 62
vjerojatnost nastanka struje munje amplitude I_u, 258
vodovi za uzemljenje, 277
volt-sekundna karakteristika preskočnog napona na izolatoru, 260
vrednovanje električne otpornosti tla na području Hrvatske, 10
vremenska ovisnost struje fibrilacije, 38
vrste tla, 8

Zaključna razmatranja za uzemljenje zvjezdišta 10(20)/0,4 kV mreže, 416
zaštita od dodirnog napona i napona koraka na stupovima dalekovoda pri atmosferskim pražnjenjima, 311
zaštita od opasnog dodirnog napona i napona koraka na stupovima dalekovoda u slučaju kvara na vodu, 312
zaštita od pogonskog napona na uzemljenim stupovima dalekovoda, 308, 310
zaštita uzemljenja od korozije, 20
zaštita od električnog udara, 37
zaštitno uzemljenje, 4
zaštitno uzemljenje pokretnog objekta kombinacijom trakastih i štapnih uzemljivača, 317–320
združeno zemljenje, 5
zemljospoj, 7
zemljovod, 5

KNJIŽNICA
ELEKTRO-
TEHNIČKOG
FAKULTETA
OSIJEK

O AUTORU

Dr. sc. Franjo Majdandžić rođen je 4. travnja 1934. u Ivanjskoj, Banja Luka (BiH), gdje je živio i radio do 1992., nakon čega živi u Zagrebu i radi na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu (smjer energetika) u Ljubljani 1965., magistrirao na istom fakultetu 1975. a doktorirao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu 1990. na temu *Matematički model funkcije zastoja u analizi pouzdanosti, raspoloživosti i efikasnosti nadzemnih radova* pod voditeljem prof. dr. sc. Vladimira Mikuličićem.

Na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, u razdoblju od 1992. do danas predaje predmete: elektroenergetska postrojenja, sklopni aparati, visokonaponska tehnika, transformatori i električne instalacije, te rasvjeta.

Do 1992. radio je u BiH, uglavnom u Banja Luci, u elektroprivredi, u obrazovnim institucijama i na rukovođenju znanstveno-istraživačkog poduzeća *Institut zaštite*, gdje je bio osnivač i glavni urednik znanstveno-stručnog časopisa *Zaštita i unapređenje čovjekove okoline*.

Autor je stručne knjige *Niskonaponske mreže u elektroprivredi* (1983.). Autor je niza znanstvenih i stručnih radova: objavio je 8 radova u časopisima i 8 radova u zbornicima radova s različitih skupova. Bio je voditelj dva međunarodna projekta iz područja održavanja i upravljanja elektroenergetskih postrojenja, preko dvadeset domaćih projekata iz područja racionalne potrošnje električne energije i šesnaest projekata iz područja zaštite unapređenja životne i radne sredine. Dobitnik Znanstvene nagrade – priznanja Univerziteta *Đuro Pucar Stari*, Banja Luka, za znanstveno-istraživački rad iz područja zaštite i unapređivanja životne i radne sredine (1987.). Kao rukovoditelj tvrtke *Tehnički servis d.o.o.*, Zagreb, nominiran je za Zlatnu knjigu najuspješnijih hrvatskih poduzetnika u posljednje tri godine (ocjena Zavoda za poslovna istraživanja – Zagreb).

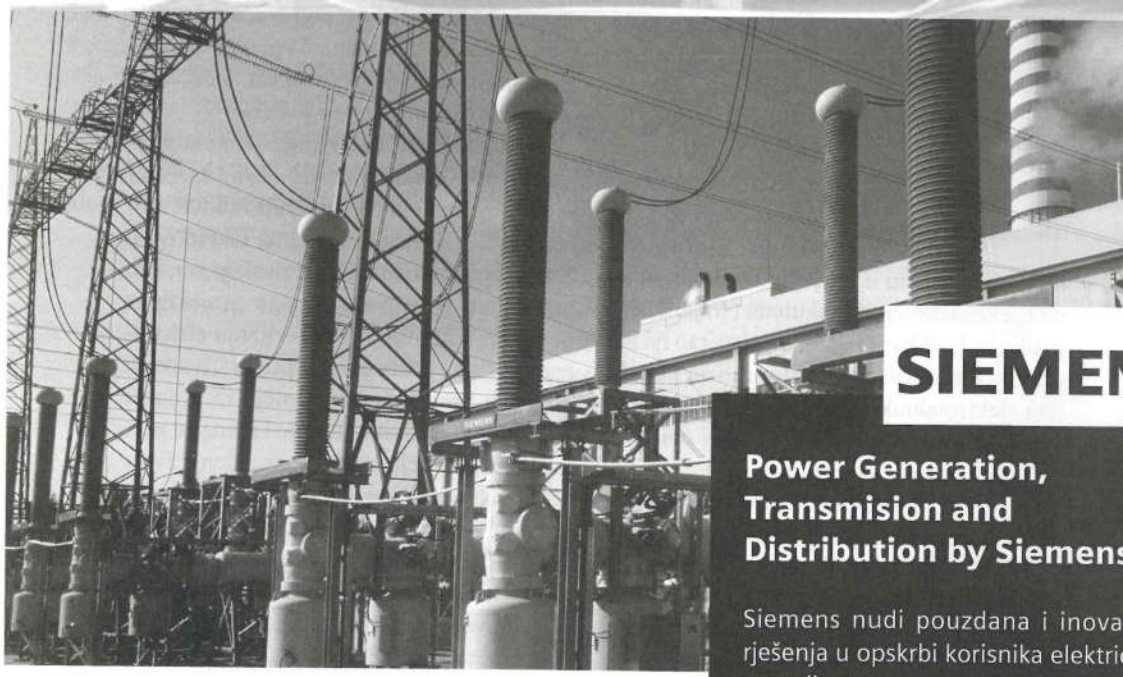
MJERNI INSTRUMENTI
BELMET 97
ZAGREB
www.belmet97.hr

GENERALNI ZASTUPNIK U RH ZA
METREL FLUKE
Raytek BEHM

ČULINEČKA C. 29, 10 040 ZAGI
TEL: 01| 2989-
FAX:01| 2864-
belmet97@zg.hine
www.belmet97

Veliki izbor mjernih instrumenata za razne namjene:

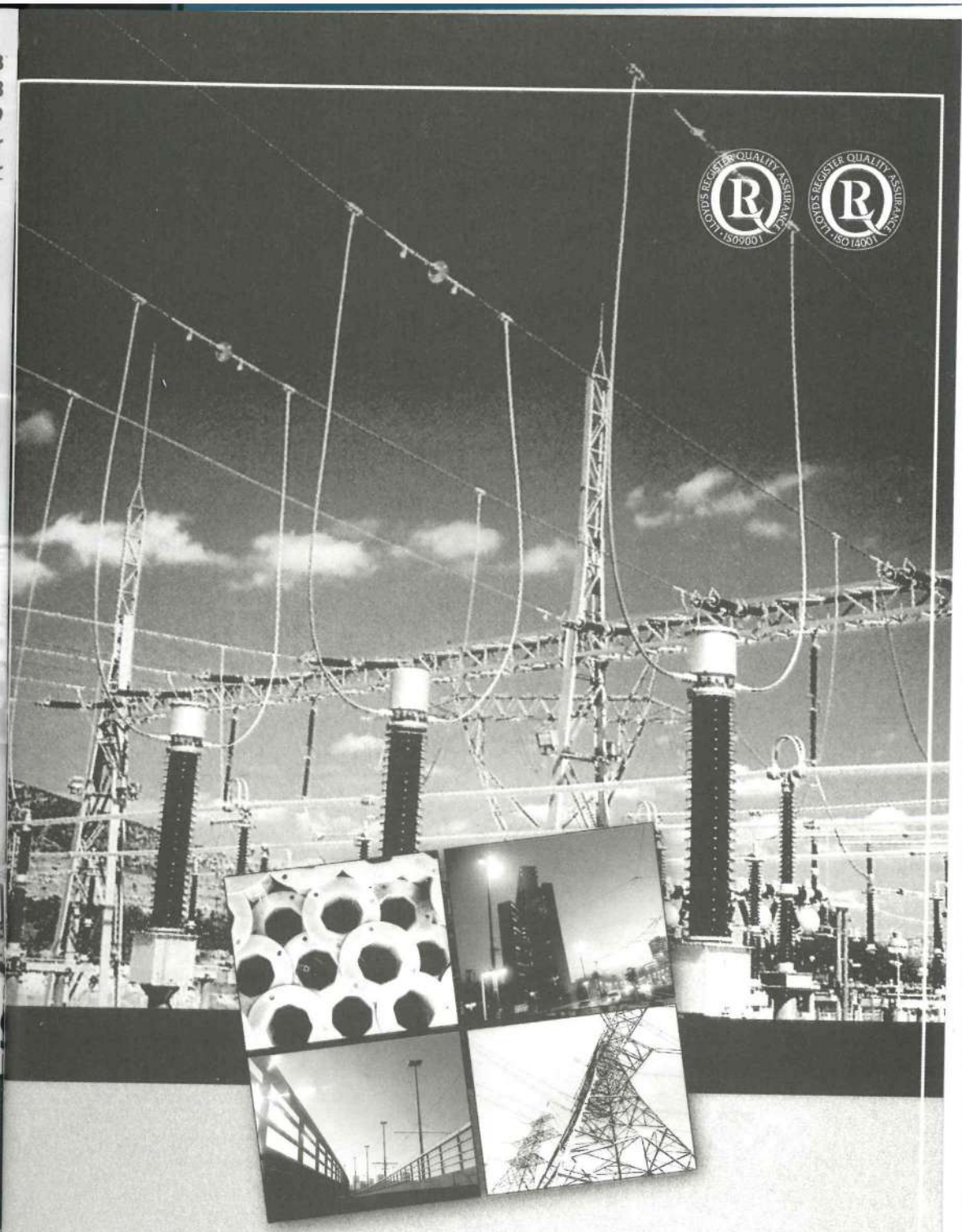
-Duspoli, indikatori napona
-Multimetri, strujna kliješta
-Ispitivanje radne okoline - mjerenje temperature, vlage, buke, protoka, svjetlosti, otpora izolacije, otpora uzemljenja, dielektrične čvrstoće, svih električnih veličina,...
-Ispitivanje i atestiranje elektro-instalacija
-Ispitivanje gromobranske zaštite
-Visokonaponska ispitivanja (do 380kV)
-Prenaponska zaštita
-Osciloskopi - stolni, prijenosni
-Mrežni analizatori, Datta loggeri
-Beskontaktno (laserko) mjerenje temperature i udaljenosti
-Detektori kabela i metala pod zemljom ili žbukom
-Dinamometri
-Mjerni pribor (kablovi, krokodil-hvataljke,...)
-Ispitivanje i certifikacija LAN mreža (CAT6)
-Telekomunikacijski mjerno-ispitni instrument
-Termografija - termovizija



SIEMEN

Power Generation, Transmision and Distribution by Siemens

Siemens nudi pouzdana i inova rješenja u opskrbi korisnika elektri energijom.
Trebate li više informacija, obrati na Siemens d.d., PG/PTD;
Heinzelova 70a, 10000 Zagreb
Tel.: +385 1 6105 607;
Faks: +385 1 6040 632



DALEKOVOD®

Dalekovod d.d. za inženjering,
proizvodnju i izgradnju
Zagreb, Ulica grada Vukovara 37

www.dalekovod.com

Fakultet elektrotehnike, računarstva
i informacijskih tehnologija Osijek
621.31
MAJ
u
1594
3480

ISBN 953-96399-6-4
9 789539 639967